

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
TIERRA Y EL ESPACIO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE COSTA Y EVALUACIÓN DE
RIESGOS COSTEROS EN ZONA SUJETA A ALTA PRESIÓN
ANTROPOGÉNICA EN EL INTERIOR DEL GOLFO DE
CALIFORNIA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA: DSAS Y CERA

Tesis para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

Presenta:
YEDID GUADALUPE ZAMBRANO MEDINA

Directores:
DR. CUAUHTÉMOC FRANCO OCHOA.
DR. WENSESLAO PLATA ROCHA.

Culiacán, Sinaloa, Enero de 2020

DEDICATORIA

A mi hija.

Posiblemente en este momento no entiendas mis palabras pero lo entenderás y quiero que sepas que eres la razón de este logro en mi vida, eres mi principal fuente de motivación e inspiración para superarme cada días más y luchar para que la vida nos depare un mejor futuro. Dedico esta tesis a ti hija, te dedico cada esfuerzo que realice en la construcción de esta y agradezco a Dios por darme tan hermosa compañía.

A mis padres.

Esta tesis es un logro más que llevo a cabo, y es gracias a ustedes por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, me llena de orgullo ser su hija y no hay manera de devolverles tanto que me han ofrecido y apoyado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a la Facultad de Informática y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, las cuales son sede del programa de Posgrado en Ciencias de la Información de la Universidad Autónoma de Sinaloa, que me brindó la oportunidad de ejercer mis estudios de maestría.

De igual manera deseo agradecer, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la maestría.

Agradezco profundamente a mis directores de tesis Dr. Cuauhtémoc Franco Ochoa y Dr. Wenseslao Plata Rocha, principalmente por su paciencia, entrega e invaluable conocimientos brindados que me permitieron alcanzar los objetivos de esta investigación.

Agradezco a los lectores críticos, Dra. Xóchitl Guadalupe Torres Carrillo, Dr. Manuel E. Trejo Soto, Dr. Sergio Alberto Monjardin Armenta, por las valiosas contribuciones que hicieron al trabajo final y por el tiempo que dedicaron para revisarlo.

Asimismo, deseo agradecer a la Secretaria de Marina (SEMAR) y al Instituto Mexicano de Transporte (IMT) por los datos brindados para llevar a cabo esta investigación.

RESUMEN

Las zonas costeras de importancia ambiental a menudo están sujetas a una alta presión antropogénica debido a las necesidades de desarrollo socioeconómico local, regional o nacional. Tal es el caso de algunas áreas costeras dentro del Golfo de California. En este contexto, las evaluaciones de la línea de costa y el riesgo costero pueden proporcionar implicaciones significativas para la protección y el manejo costero al planificar el desarrollo de un área costera. Por lo tanto, esta investigación, se enfocó en examinar los cambios históricos de la línea de costa en períodos decadales que va desde 1981 a 2016, y, a corto plazo del 2016 a 2018, en respuesta a acciones antropogénicas y evaluar la vulnerabilidad y el riesgo asociados a la erosión costera de una franja litoral en el municipio de Guasave, Sinaloa, dentro del Golfo de California. El análisis de la costa se realizó utilizando el Sistema Digital de Análisis de la Costa (DSAS) y la evaluación del riesgo costero se realizó con la Evaluación del Riesgo de Erosión Costera (CERA). Los datos se obtuvieron de satélite Landsat, INEGI, CONANP, CONABIO, ATLOOM y SEMAR. Los resultados obtenidos indican que la construcción de las presas Guillermo Blake Aguilar y Gustavo Díaz Ordaz en 1972 y 1981 respectivamente, causaron una rápida recesión de toda la costa, y los rompeolas promovieron cambios notables de erosión y acreción. Además de eso, el riesgo varió espacialmente de manera similar a la vulnerabilidad, pero mostró una gravedad más baja en la clasificación, debido a la baja gravedad en la clasificación de las posibles consecuencias que podrían afectar el área de estudio. Los resultados presentados en este estudio proporcionan datos reales para que los administradores de esta zona costera eviten los futuros asentamientos humanos en áreas de alto riesgo.

ABSTRACT

Coastal areas of environmental importance are often subject to high anthropogenic pressure due to local, regional or national socioeconomic development needs. Such is the case of some coastal areas within the Gulf of California. In this context, assessments of shoreline dynamics and coastal risk may provide significant implications for coastal protection and management when planning the development of a coastal area. Thus, in this paper, focused on examining the historical shoreline changes in both decadal from 1981 to 2016, and, in the short term time from 2016 to 2018 in response to anthropogenic actions and to assess the vulnerability and risk associated to coastal erosion of the northern coastal in the municipality of Guasave, Sinaloa, within the Gulf of California. The shoreline analysis was realized using Digital Shoreline Analysis System (DSAS) and the coastal risk assessment was performed with Coastal Erosion Risk Assessment (CERA). The data were obtained from Landsat satellite, INEGI, CONANP, CONABIO, ATLOOM and SEMAR. The results obtained indicate that the construction of Dams Guillermo Blake Aguilar and Gustavo Díaz Ordaz in 1972 and 1981 respectively, caused a rapid recession of the entire shoreline, and the breakwaters promoted notable erosion and accretion changes. Beside that, the risk varied spatially in a similar way to vulnerability, but showing lower severity in the classification, due to the low severity in the classification of potentials consequences that could affect the study area. The results presented in this study provide real dates for managers from this coastal area to prevent the future human settlements at high-hazard-risk areas.

ÍNDICE

Capítulo 1. Planteamiento del problema.....	1
1.1. Introducción	2
1.2. Hipótesis y objetivos	4
1.2.1. Hipótesis	4
1.2.2. Objetivos.....	4
1.3. Justificación.....	5
1.4. Descripción del área de estudio.....	6
Capítulo 2. Marco teórico.....	9
2.1. Conceptos relacionados con la costa: litoral o zona costera, playa y línea de costa	10
2.2. Erosión costera y factores relacionados	11
2.2.1. Erosión costera.....	11
2.2.3. Factores que influyen en erosión costera.....	12
2.3. Percepción Remota o Teledetección.....	15
2.4. Empleo de SIG en la cuantificación de la erosión costera.....	16
2.5. Sistema Digital de Análisis de Costas: DSAS	18
2.6. Conceptos relacionados al riesgo costero	22
2.7. Métodos de evaluación de riesgos costeros	25
2.7.1. Índice de Vulnerabilidad Costera	27
2.7.2. Metodología para la Elaboración de Atlas Nacional de Riesgo	28
2.7.3. Enfoque Smartline (SL).....	30
2.7.4. Rueda de Peligro Costero (CHW).....	31
2.8. Evaluación del Riesgo de Erosión Costera: CERA	33
Capítulo 3. Metodología.....	37
3.1. Procesamiento de las imágenes de satélite	38
3.2. Digitalización de la línea de costa	39
3.3. Análisis multi-temporal de la línea de costa mediante DSAS	40
3.3.1. Geodatabase.....	40
3.3.2. Líneas de costa.....	41
3.3.3. Línea base.....	42

3.3.4. Transectos.....	43
3.4. Evaluación del Riesgo de Erosión Costera: CERA	44
3.4.1. Recolección de los datos.....	45
3.4.2. Procesamiento de los datos.	46
Capítulo 4. Resultados y Discusión.....	56
4.1. Análisis espacio-temporal de la línea de costa aplicando la herramienta DSAS.....	57
4.1.1. Análisis decadal: 1981 – 1993.....	57
4.1.2. Análisis decadal: 1993 – 2004.....	58
4.1.3. Análisis decadal: 2004 – 2016.....	58
4.1.4. Análisis a corto plazo: 2016 – 2018.....	59
4.1.5. Análisis a largo plazo: 1981 – 2018.....	60
4.2. Evaluación del Riesgo de Erosión Costera: CERA	63
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	67
Bibliografía:	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Satelites de la constelación Landsat.	17
Tabla 2. Fuentes bibliográficas sobre la aplicación de la metodología DSAS.....	21
Tabla 3. Revisión bibliográfica sobre metodologías de vulnerabilidad y riesgo costero	26
Tabla 4. Clasificación de las variables del índice de vulnerabilidad costera para la costa atlántica de Estados.	28
Tabla 5. Clasificación de parámetros para CERA.	36
Tabla 6. Combinaciones realizadas con las bandas multiespectrales.	39
Tabla 7. Requerimientos de las líneas de costa.	41
Tabla 8. Requerimientos de los campos de atributo para la línea base.	43
Tabla 9. Tasas de cambio promedio de la línea de costa para cada uno de los periodos y sectores analizados.	62
Tabla 10. Movimiento neto promedio de la línea de costa para cada uno de los periodos y sectores analizados.	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de Estudio.	7
Figura 2. Rueda de Peligo Costero.	32
Figura 3. Interfaz gráfica de CERA.....	34
Figura 4. Matriz de riesgo utilizada por CERA	35
Figura 5. Línea base creada para la zona de estudio.	42
Figura 6. Mapa indicador de Distancia a la costa, para el cálculo de vulnerabilidad.	47
Figura 7. Mapa indicador de Topografía, para el cálculo de vulnerabilidad.....	48
Figura 8. Mapa indicador de Geología, para el cálculo de vulnerabilidad.....	48
Figura 9. Mapa indicador de Geomorfología, para el cálculo de vulnerabilidad.	49
Figura 10. Mapa indicador de Uso de suelo, para el cálculo de vulnerabilidad.....	50
Figura 11. Mapa indicador de Acciones antropogénicas, para el cálculo de vulnerabilidad. .	50
Figura 12. Mapa indicador de Altura máxima de ola significativa, para el cálculo de vulnerabilidad.	51
Figura 13. Mapas indicador de Rango máximo de marea, para el cálculo de vulnerabilidad.	52
Figura 14. Mapa indicador de Tasas de erosión / acreción, para el cálculo de vulnerabilidad.	52
Figura 15. Mapa indicador de Densidad de población, para el cálculo de consecuencia.....	53
Figura 16. Mapa indicador de Densidad de población y economía, para el cálculo de consecuencia.	54
Figura 17. Mapa indicador de Ecología, para el cálculo de consecuencia.	54
Figura 18. Mapa indicador de Patrimonio, para el cálculo de consecuencia.	55
Figura 19. Tasas de Cambio o tasa de punto final (EPR).....	60
Figura 20. Histograma representativo del desplazamiento neto de la línea costera para cada uno de los periodos de analizados.	61
Figura 21. Mapa de resultados dsobre la Vulnerabilidades para el área de estudio.....	63
Figura 22. Mapa de resultados de Consecuencia para le área de estudio.....	64
Figura 23. Mapa de resultados sobre el Riesgo Costero para el area de estudio.....	65

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras tienen una gran importancia socioeconómica debido al flujo de servicios y bienes ecológicos proporcionados al sistema económico de una región. Aunque están expuestos a importantes riesgos humanos, económicos, ambientales y diversas vulnerabilidades (Lemée et al., 2019). Tal es el caso de algunas áreas costeras dentro de la región del Golfo de California, especialmente aquellas con alta importancia biológica que requieren la implementación de planes adecuados de manejo costero (Enríquez-Andrade et al., 2005). Por ejemplo, la zona llamada *Marismas Nacionales*, y las franjas costeras del norte de los estados de Baja California, Sonora y Sinaloa, entre otras.

Estas zonas costeras son centros potenciales que se encuentran en desarrollo dentro de la región del Golfo de California y las cuales aumentarán la presión antropogénica sobre sus recursos ecológicos. En este contexto, las evaluaciones de los cambios históricos de la línea de costa y el riesgo costero pueden tener implicaciones significativas para la protección y el manejo costero al planificar el desarrollo de un área costera. Por lo cual se han propuesto varias metodologías en la literatura especializada para analizar los cambios de la línea de costa de manera precisa. Por ejemplo, el Sistema Digital de Análisis de la costa (DSAS) (Thierler et al., 2009) el cual se ha utilizado de forma masiva en el análisis de la costa (Ahmad and Lakhani, 2012; Cifuentes et al., 2017; Hoyos et al., 2006; Jonah et al., 2016; Kallepalli et al., 2017; Lee et al., 2019; Prieto et al., 2012), y el Método de cambios de polígonos (Albuquerque et al., 2013). De igual manera, se han desarrollado muchos métodos para el estudio de la vulnerabilidad y riesgo, así como el Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) (Thieler y Hammar-Klose, 1999), la Evaluación de vulnerabilidad y riesgo costero (CVRA) (Coelho, 2005), el Enfoque Smarline (Sharples, 2006; Sharples et al., 2009), la Evaluación de vulnerabilidad Dinámica e interactiva (DIVA) (Hinkel y Klein, 2009), la Rueda de Peligro Costero (CHW) (Larson y Wise, 1998; Rosendahl Appelquist et al., 2016), Evaluación de riesgo de erosión costera (CERA) (Narra et al., 2017), y el Módulo de evaluación de riesgos costeros (CHAM) (Viavattene et al., 2018).

En México, las contribuciones más importantes sobre riesgo costero han sido presentadas por el Centro Nacional de Desastres (CENAPRED), uno de sus aportes es la “Guía básica para la Elaboración del Atlas Estatal y Municipal de Riesgos y Peligros” (CENAPRED, 2014; Escudero Castillo et al., 2006), y “Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en la República Mexicana”(CENAPRED-SEGOB, 2014). Desafortunadamente, de todos los métodos mencionados anteriormente, ninguno de ellos puede usarse como el más apropiado para todas las áreas de estudio. Por lo tanto, seleccionar un método para un área de estudio en particular dependerá de los indicadores requeridos, la escala, los objetivos y los escenarios de aplicación apropiados (Narra et al., 2019).

Esta tesis se llevó a cabo con el objetivo de analizar los cambios históricos de la línea de costa en respuesta a acciones antropogénicas (presas y rompeolas) utilizando la metodología DSAS, y para evaluar la vulnerabilidad, consecuencias y riesgos asociados a la erosión costera aplicando el método CERA, en una franja del litoral en el municipio de Guasave, Sinaloa, dentro del Golfo de California. Esta zona de estudio es de gran interés por su importancia biológica y su alta presión antrópica, lo cual ha preocupado a instituciones científicas y de conservación.

1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.2.1. HIPÓTESIS

Las evaluaciones de la dinámica de la línea de costa, de vulnerabilidad y riesgo costero pueden proporcionar importantes implicaciones para la protección y gestión del litoral al momento de planificar el desarrollo de un área costera.

1.2.2. OBJETIVOS

Evaluar en la franja costera norte del estado de Sinaloa los cambios de la línea de costa a escala de tiempo decadal y de corto plazo en respuesta a las acciones antropogénicas, la vulnerabilidad y el riesgo a la erosión.

Para alcanzar dicho objetivo se han propuesto los siguientes objetivos particulares:

- 🌐 Obtener las líneas de costa de la zona de estudio mediante el método de foto-interpretación visual y digitalización partir de imágenes satelitales del sistema Landsat (1981-2018).
- 🌐 Calcular la tasa de cambio y el desplazamiento neto de la línea de costa para el área de estudio utilizando DSAS.
- 🌐 Seleccionar y recopilar información base (topografía, geomorfología, uso de suelo, oceanografía, ecología, economía, etc.) del área de estudio.
- 🌐 Calcular la severidad de la vulnerabilidad y riesgo a la erosión del área de estudio mediante CERA.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las zonas costeras son lugares de mucha importancia en el mundo, pues en ellas se concentran grandes poblaciones, las cuales están en constante crecimiento. Si consideramos la costa norte del estado de Sinaloa perteneciente al Golfo de California, observamos que las investigaciones sobre variabilidad de la línea costera, vulnerabilidad, consecuencia y riesgo costero son escasos, pese a la importancia de sus ecosistemas para la biodiversidad nacional e internacional, y de su potencial pesquero y turístico.

Se necesitan desarrollar nuevas investigaciones científicas sobre la variabilidad de la línea de costa y su riesgo ante la erosión, que puedan cuantificar las potenciales modificaciones que pueda ejercer alguna actividad antrópica, fenómeno meteorológico y aumento del nivel del mar debido al cambio climático, los cuales representan para estos sistemas una amenaza más a los procesos erosivos y de inundación que actualmente ya sufren estas zonas.

Por tal razón, en este trabajo se propone examinar los cambios históricos de la línea de costa en el tiempo decenal y a corto plazo en respuesta a las acciones antropogénicas y evaluar la vulnerabilidad y el riesgo asociados a la erosión costera de la franja litoral del norte del estado de Sinaloa, se eligió esta zona de estudio porque las proyecciones de crecimiento en esta área han causado la preocupación de la conservación y la ciencia, por ser un área sujeta a una alta presión antropogénica y al mismo tiempo de importancia biológica (Enríquez-Andrade et al., 2005; Jiménez-Illescas et al., 2019) y la disponibilidad de datos para la aplicación de este estudio.

Esta investigación pretende ser una guía para futuros estudios de costas inestables dentro de la región del Golfo de California, siendo útil para el reconocimiento de los cambios de la línea de costa, vulnerabilidad, consecuencia y riesgo costero, por lo tanto, también para una buena gestión costera y planificación para poder asegurar su buen estado tanto en el presente como en el futuro.

1.4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio tiene aproximadamente 45 km de largo que comprende tres playas: Macapule, Las Glorias y Bellavista, ubicadas en la parte oriental y baja del Golfo de California (**Figura 1**).

Es una costa arenosa abierta del tipo de isla continental y barrera. El relieve es plano y de poca pendiente, y la plataforma continental en el frente es, en promedio ancha y poco profunda (Kasper-Zubillaga et al., 2007). El clima es de árido a semiárido con lluvias principalmente en verano, la temperatura media anual en los registros es 24.2 °C, con un promedio anual máximo de 32 °C y la precipitación promedio anual es de 459 mm (Jiménez-Illescas et al., 2019).

Los vientos dominantes se caracterizan por velocidades típicas de 2 a 6 m/s en dirección SW, pero puede presentarse vientos que alcanzan hasta los 24 m/s en dirección SE; estos últimos son generalmente de origen ciclónico (Alcántar, 2007). La marea es de tipo micromareal con rangos de 1.2 m en marea viva y 0.5 m en marea muerta (<http://mareografico.unam.mx/>), típicamente, en el transcurso de un día lunar se presentan dos pleamares y dos bajamares que se caracteriza por una evidente desigualdad diurna entre las pleamares superior e inferior o las bajamares superior e inferior; la variación cíclica anual del nivel medio del mar es de aproximadamente 32 cm, que alcanza su mayor elevación en septiembre, después de lo cual cae a un valor mínimo en marzo. La altura de ola significativa en aguas profundas predominante varía entre 0,5 y 1,5 m con un período de 6-12 s, principalmente desde el sur y el suroeste (Franco-Ochoa et al., 2019).

La población y la infraestructura se concentran en la parte central del área de estudio, en un sitio llamado playa "Las Glorias". Como se documenta en (Franco-Ochoa et al., 2019), este sitio está sujeto a una alta presión antropogénica, lo que ha provocado que la costa se haya retirado más de 145 m en los últimos años. Mientras que, en el resto de la costa del área de estudio, no hay informes de actividad antropogénica y cambios significativos en la costa.

Las acciones antrópicas importantes que afectan la zona de estudio son la construcción sobre el río Sinaloa, tales como las presas Lic. Gustavo Díaz Ordaz y Lic. Guillermo Blake Aguilar en 1972 y 1981, respectivamente, y la rectificación de las desembocaduras del mismo río entre 1992 y 1993 y la del estero de La Piedra en 2006, ambas con escolleras de material rígido.

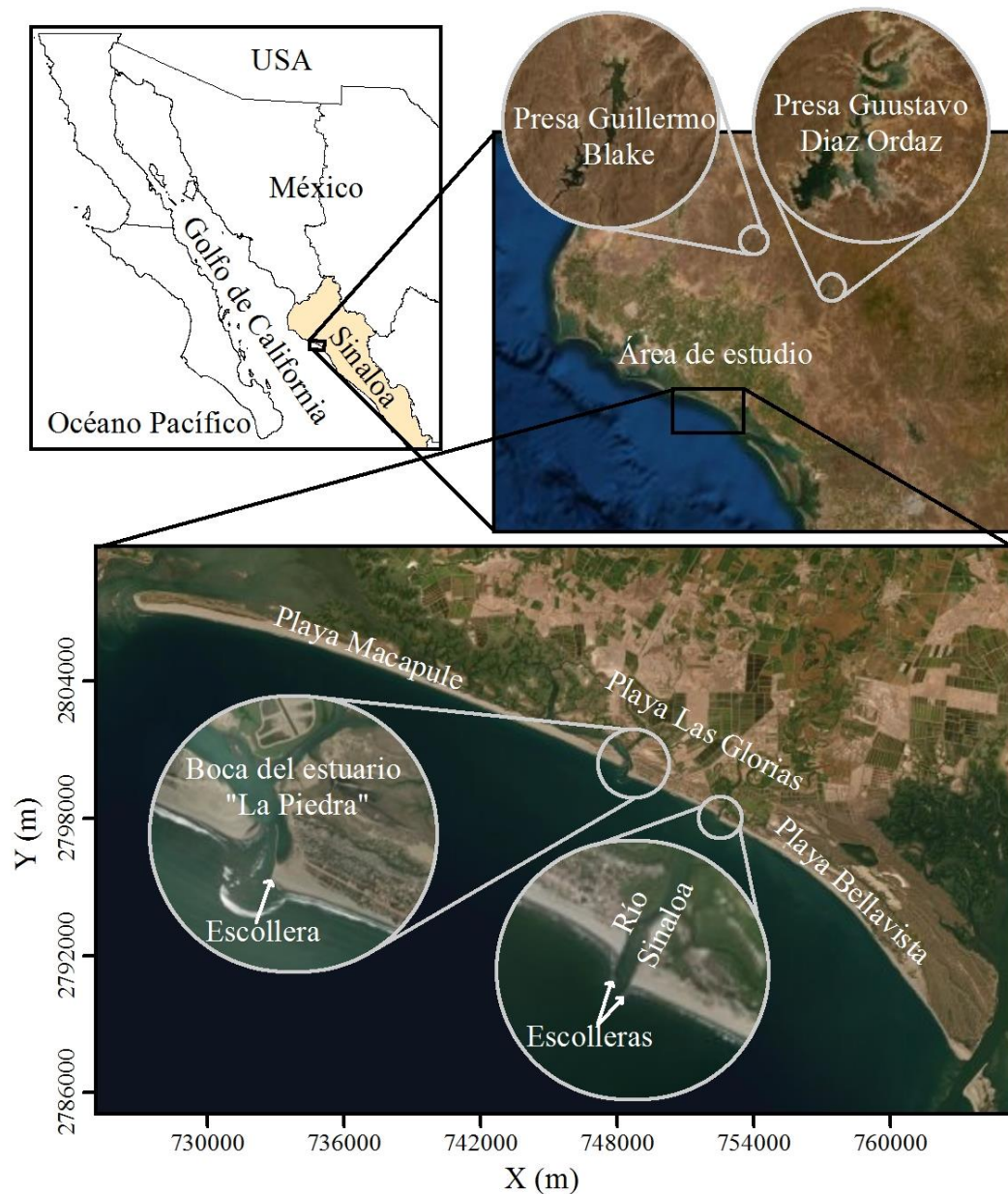


Figura 1. Localización del área de Estudio. Fuente: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, y la comunidad de usuario de SIG.

Geográficamente se delimita al norte por la cuenca llamada “Bahía Lechuguilla–Ohiura–Navachiste”, denominada *sitio Ramsar* (Humedales de Importancia Internacional) número 1826 como “*Sistema lagunar San Ignacio Navachiste Macapule*” ya que forma parte de uno de los 142 humedales designados en México de importancia internacional; al sur por la cuenca del río Sinaloa, y al oeste por las aguas del Golfo de California.

La costa en estudio se ubica dentro de la provincia denominada Llanura costera del pacífico, y está delimitada por un litoral con desarrollo de acumulaciones arenosas, sus formaciones geológicas son gravas, limos y arcillas, formando pequeñas franjas de abanicos aluviales dando lugar a la formación de barras y flechas. (INEGI, 2017).

La población en la zona de estudio se concentra en la localidad de Las Glorias con una población de 54 habitantes y 16 viviendas particulares habitadas según el censo de población y vivienda 2010 de INEGI. No existe un nivel de población alto en la zona de estudio, pero el factor económico es relevante. Ya que existen actividades primarias que se desarrollan en la zona de estudio como pesca, agricultura y turismo. Respecto al patrimonio material existen algunos establecimientos dedicados al comercio local y de servicios; existen vías de comunicación terrestre que comunican a Playa Las Glorias con la cabecera municipal Guasave, a la cual el gobierno del Estado de Sinaloa ha hecho inversiones para mejorar esta vialidad dado el aumento del turismo local principalmente.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA COSTA: LITORAL O ZONA COSTERA, PLAYA Y LÍNEA DE COSTA

La zona costera es una zona de transición entre los componentes marino y continental del planeta. Es ampliamente reconocida como uno de los más importantes elementos de la biosfera con una amplia diversidad de ambientes y recursos. Una intensa interacción de ambientes caracteriza a las zonas costeras del mundo y el balance de estas interacciones origina ecosistemas con características ambientales únicas, regidas a su vez por procesos físicos, químicos y biológicos de alta dinámica.

Los ambientes costeros están sujetos a cambios que varían ampliamente en escala geográfica, tiempo y duración, que al combinarse crean sistemas biológicamente muy productivos, pero vulnerables a las presiones ambientales de la diversas actividades humanas (Bolletto et al., 2011). La costa es una zona amplia que abarca relieves de litoral, acantilados, terrazas marinas y planicies costeras, están en constante transformación por la acción de las olas, corrientes litorales, mareas, movimientos tectónicos, oscilaciones del nivel del mar, erosión, acumulación fluvial y la actividad humana (Kokot y Chomnalez, 2012; Torresan et al., 2012).

Los cambios morfológicos a lo largo de los litorales se pueden apreciar por la acumulación de arenas formando playas extensas de pendientes suaves, acompañadas de dunas, tómbolos, lengüetas, barreras, o bien, por los procesos de erosión o remoción de las arenas exponiendo sustratos rocosos, formando cavernas, farallones, puntas y playas angostas de pendientes fuertes la mayoría de las veces, con materiales gruesos de arena y gravas (Torres Rodríguez, V. et al., 2010).

Las playas son acumulaciones de materiales no consolidados en zonas litorales y están sujetas a la acción del oleaje, las corrientes, los vientos y las mareas. En condiciones de concentraciones de detritos (material suelto o sedimentos, productos de la erosión) de alta densidad y resistencia, las arenas de playas pueden ser ricas en minerales (Carranza-Edwards, 2010). La playa es sólo la parte activa y visible de la costa, la cual muestra fluctuaciones de corto término que a veces no coinciden con las de largo plazo, ya que una zona puede

presentar tendencia a la erosión o acreción lenta, con episodios en aparente oposición a la tendencia general (Kokot, 2004).

La riqueza y diversidad de recursos presentes en las zonas costeras conllevan la correspondiente concentración de actividades y asentamientos humanos a lo largo de los litorales y estuarios en todo el mundo. Se estima que cerca de la mitad de la población humana vive en /o cerca de las costas y a pesar de la que densidad varía ampliamente en las diferentes regiones, hay una tendencia general a moverse de regiones continentales hacia las costas (Bollete et al., 2011).

Por lo tanto, los procesos de cambio de las zonas costeras desencadenan importantes implicaciones ambientales y problemas socio-económicos para las poblaciones locales y los diferentes sectores productivos de la región, si no son contemplados oportunamente por los organismos territoriales competentes. En este sentido, el análisis de la línea costera, definida como la interface entre la tierra y el mar, permite caracterizar las variaciones del medio ambiente costero y se torna fundamental en la gestión de recursos, la protección del medio ambiente, el desarrollo costero sostenible, la planificación de los asentamientos y la zonificación de riesgos (Cifuentes et al, 2017).

2.2. EROSIÓN COSTERA Y FACTORES RELACIONADOS

2.2.1. EROSIÓN COSTERA

La erosión costera es el avance del mar sobre la tierra, medido en un periodo suficientemente amplio para eliminar las fluctuaciones del clima, de las tormentas y de los procesos sedimentarios a nivel local (Pat Doody, et al, 2005). Otra definición sería la propuesta por (Kokot, 2004) que define la erosión costera como el resultado de un exceso de remoción de sedimentos respecto del aporte suministrado al área en un determinado período. En la costa de sedimento blando (arenas, gravas), el equilibrio depende de la cantidad de material que se deposita en la orilla proveniente de otras fuentes (bancos de arena, otras playas, acantilados erosionados, etc.) y la que se escapa. Si el balance de sedimentos es positivo, la orilla avanza

hacia el mar (acreción). Si es negativo, la costa retrocede (erosión). La tasa de erosión se mide en volumen / longitud / tiempo (por ejemplo m³/m/año), pero debido a que se utiliza a menudo para mostrar la velocidad de la disminución de la costa, se expresa generalmente en m/año. La velocidad de retroceso depende de muchos factores (tipo de costa, energía de las olas y las mareas, etc.) y puede ser desde unos pocos centímetros hasta decenas de metros por año (Erosión - CORIMAT).

La erosión de las costas puede ser de origen natural: huracanes, inundaciones, actividad tectónica, deslizamientos submarinos, o de origen antrópico, inducidas por las actividades humanas, como por extracción de líquidos del suelo, elevación del nivel del mar debido al calentamiento global, represamiento de ríos, modificación de litorales por construcción, entre otros. La velocidad de erosión puede variar considerablemente, por ejemplo, los huracanes pueden tener una respuesta inmediata en la erosión de las playas, mientras que los deshielos de las zonas polares, pueden tardar más (Carranza-Edwards, 2010).

La erosión costera ha provocado la reducción de playas, el avance de la línea de costa hacia el continente, la pérdida de playas, la pérdida de ecosistemas (manglares), la destrucción de playas de anidación de tortugas marinas, la intrusión salina, y cambios en la batimetría y morfología costera, entre otros problemas, provocando un impacto en obras civiles como carreteras, líneas eléctricas, casas habitación, e infraestructura petrolera (Torres Rodríguez, V., et al, 2010).

2.2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EROSIÓN COSTERA

Los procesos de erosión costera son el resultado de una compleja gama de factores, tanto naturales como humanos, combinados, que han variado en escala, intensidad e importancia a lo largo del tiempo. La intensa ocupación de las zonas costeras, la reducción de sedimentos transportados por los ríos como resultado de la construcción de presas, la artificialización de la costa o el aumento del nivel medio del mar, se señalan comúnmente como la fuente de los procesos de cambio que están ocurriendo (Pires et al., 2012).

Uno de los factores más importantes a considerar en la actualidad es el cambio climático el cual se define como “una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un periodo prolongado (normalmente decenios o incluso más), debido a la variabilidad natural del clima o como resultado de la actividad humana” (Tejada De la Cruz, 2018). El cambio climático está ampliamente reconocido como un problema ambiental clave que afecta a los sistemas naturales y humanos en todo el mundo.

El IPCC define el cambio climático como la “Variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos y el cual puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra (IPCC, 2007).

Los estudios del cambio climático en las costas se ejecutan en tres escalas: una global, donde el detalle de la información inicial y los resultados alcanzados son de baja resolución (escala nacional o internacional); una regional, centrada en los planes regionales y cuya información y resultados son de nivel intermedio, y finalmente una local, donde se elaboran los planes locales y tiene un alto nivel de detalle de la información y los resultados presentados (Rondón Ramírez, 2018). Asimismo, en las últimas décadas se han desarrollado índices que permiten evaluar la vulnerabilidad de las zonas costeras en el mundo.

Las zonas costeras también son sensibles al aumento del nivel del mar y a los cambios en los procesos climáticos (tormentas). De estos el aumento del nivel del mar es la causa más palpable y de mayor importancia en los tiempos actuales. Los rangos de elevación del nivel del mar se han incrementado en las últimas décadas y no son los mismos de región a región, ya que dependen en gran medida de las características geomorfodinámicas específicas del sitio (De Figueiredo et al., 2018; Tejada De la Cruz, 2018).

Por otra parte, el efecto de dar una misma tasa de incremento puede perturbar en diferente magnitud a cada región, dependiendo de variables tales como pendiente de la costa, tipos de playa, amplitud de marea, estado de los acuíferos costeros, asentamientos humanos,

infraestructura urbana, así como el tipo de actividades humanas que se realizan en la zona (Díaz, et al, 2011).

A pesar de que existe un sentido común entre la mayoría de los investigadores del mundo sobre el hecho de que el nivel del mar está aumentando, sus tasas crecientes y el alcance de los impactos regionales / locales siguen siendo objeto de controversia (De Figueiredo et al., 2018).

En el 2007, el Panel intergubernamental para el Cambio Climático argumentó que en los pasados 100 años el nivel del mar había incrementado 20 cm, y que en los próximos 100 años, el nivel del mar será de entre 0.5 a 1.0 m mayor que el nivel en 1990.

El aumento relativo del nivel del mar tiene una gran variedad de efectos sobre los procesos costeros. Además de elevar el nivel del océano, el aumento del nivel del mar también incrementa todos los procesos costeros que operan en torno al nivel promedio del mar (mareas, oleajes) (Bollete et al., 2011).

Las afectaciones que puede tener un incremento en el NMM sobre la regresión de la línea de costa pueden ser: la pérdida de playas y humedales, infraestructura costera, áreas urbanas por inundación, así como el posible impacto biológico por cambios en la estructura de los ecosistemas, entre otros factores. También hay otros componentes mareográficos como el fenómeno de El Niño que aumenta el nivel del mar, que, junto con las mareas astronómicas, producen los niveles del mar adecuados para que el oleaje inicie o acelere los procesos de erosión en una playa (Lizano R, 2013).

Actualmente, el papel de la actividad antropogénica es otro de los factores más importantes a considerar ya que ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento que se construyen vías de comunicación, infraestructura energética y petrolera, hoteles, casas, restaurantes, etc. en su parte continental (supraplaya), hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina (infraplaya) alterando el transporte litoral y la morfología de la playa (Torres Rodríguez, V., et al, 2010). Por lo que la influencia

humana en la zona costera ha convertido el fenómeno natural de la erosión costera en un problema social de intensidad creciente (Erosión - CORIMAT).

2.3. PERCEPCIÓN REMOTA O TELEDETECCIÓN

El término "teledetección" fue acuñado a mediados de la década de 1950 por la Geógrafa Evelyn Pruitt, de la Oficina de Investigación Naval de EE. UU., y se define como la adquisición de información sobre ciertas propiedades de fenómenos, objetos o materiales mediante un registro de energía electromagnética que emiten áreas u objetos en la superficie terrestre, océanos o la atmósfera de la tierra (Khorram et al., 2016).

La detección remota se puede definir como la recopilación de información relacionada a objetos sin estar en contacto físico con ellos pero que si exista algún tipo de interacción entre ellos como la radiación electromagnética, y se refiere al esfuerzo multidisciplinario para adquirir información sobre las características de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvienco, 2008; Khorram et al., 2016).

La radiación electromagnética, se define como la energía que se mueve con la velocidad de la luz de manera equitativa y repetitiva en el tiempo y se representa mediante el espectro electromagnético. En la actualidad se han implementado una gran variedad de sensores montados en satélites que registran información midiendo la transición de energía (reflectancia) en diferentes regiones del espectro electromagnético donde cada una de las regiones exploradas son denominadas bandas, que se identifican en nanómetros (nm), lo cual permite crear múltiples imágenes tomadas al mismo tiempo con diversas características en resolución espectral, espacial, radiométricas y temporales (Khorram et al., 2016).

La era espacial se inició con el lanzamiento del primer satélite artificial Sputnik-1 en 1957 por la Unión Soviética y en 1972 Estados Unidos comenzó con el programa Landsat, el mayor programa para la captura de imágenes de la tierra desde el espacio (**Tabla 1**) que ha estado proporcionando continuamente imágenes espaciales de la superficie terrestre de la Tierra (Khorram et al., 2016).

La USGS respalda el análisis de registro de los datos de Landsat desde agosto del 2016 reorganizando en una estructura formal la recopilación de los datos por niveles lo cual garantiza que todos los productos Landsat Nivel 1 proporcionen un archivo consistente de calidad de datos conocida para admitir análisis de series temporales y apilamiento de datos, mientras se mejoran continuamente los archivos en medida que se adquieren (USGS EROS, 2019).

2.4. EMPLEO DEL SIG EN LA CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN COSTERA

Un sistema de información geográfica (GIS, en su acrónimo inglés [Geographic Information System]) es un sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. El objetivo de SIG consiste en crear, compartir y aplicar útiles productos de información basada en mapas que respaldan el trabajo de las organizaciones, así como crear y administrar la información geográfica pertinente (ArcGIS Resource Center).

La principal ventaja del SIG es que permite identificar las relaciones espaciales entre las características y los cambios temporales dentro de un área de interés a lo largo del tiempo. Para medir y monitorear los cambios costeros, el SIG se ha utilizado ampliamente en la extracción de la línea de costa, para superponer mapas multitemporales de la costa y detectar los cambios en el tiempo. Recientemente el estudio de los cambios del litoral ha sido automatizado con el uso de DSAS (Digital Shoreline Analysis System), utilizando datos obtenidos de diferentes productos de satélite, como las imágenes Landsat, por ejemplo. Mediante el software se logran estimar tasas de cambio del desplazamiento de la costa (Cifuentes Ossa, 2017).

Tabla 1. Satelites de la constelación Landsat. Fuente:(Franco, 2017)

Satélite	Lanzamiento	Notas
Landsat 1	1972	Primero de la serie, se llamó originalmente Earth Resources Technology Satellite 1. Estuvo activo durante casi tres años y fue operado por la NASA. Incorporaba un escáner multiespectral (MSS) de cuatro canales.
Landsat 2	1975	De características similares a Landsat 1 y estuvo activo por cerca de 7 años. Operado por la NASA.
Landsat 3	1978	Tenía el mismo diseño de Landsat 2, estuvo activo por unos 5 años y fue operado por la NASA. A diferencia de sus antecesores incluyó además un sensor en una banda térmica pero este instrumento falló al poco tiempo del despliegue del satélite.
Landsat 4	1982	Operado por Earth Observation Satellite Company (EOSAT) Fue el primero en incluir un sensor Thematic Mapper (TM) de 7 bandas, una de estas termal.
Landsat 5	1984	Idéntico a Landsat 4. Fue operado por EOSAT y posee el record como el satélite de observación terrestre de mayor tiempo de actividad en la historia con 29 años de servicio.
Landsat 6	1993	Fue lanzado el 5 de octubre de 1993 pero no alcanzó su órbita.
Landsat 7	1999	Incluye una banda en pancromático con 15m de resolución espacial. Aún está activo pero la calidad de sus imágenes bajo al ocurrir una falla en el Scan Line Corrector (SLC) en mayo de 2003 que provoca que se pierdan líneas de escaneo. Es operado por el USGS.
Landsat 8	2013	Activo desde febrero de 2013. Incorpora dos sensores: el Operational Land Imager (OLI) con 9 bandas que incluyen una pancromática y, por otro, el Thermal Infrared Sensor (TIRS) con dos bandas. Es operado por el USGS
Landsat 9	2020	Lanzamiento tentativo para diciembre de 2020. Lo construirá la NASA y sus datos serán administrados por el USGS.

2.5. SISTEMA DIGITAL DE ANÁLISIS DE COSTAS: DSAS

El estudio de los cambios en la línea de costa constituye una de las principales herramientas para determinar las tasas de erosión/acreción en un sector determinado. Este análisis puede realizarse manualmente, midiendo las diferencias de posición entre las líneas de costa de diferentes periodos, sobre perfiles trazados perpendicularmente a una de ellas. Esta misma evaluación puede hacerse de manera más rápida y precisa dentro del SIG, a través de aplicaciones como “Digital Shoreline Analysis System” (DSAS) (Hoyos et al., 2006).

El sistema digital de análisis de costas (DSAS) es un complemento ESRI ArcGIS. DSAS calcula estadísticas de tasa de cambio para una serie temporal de datos vectoriales de la costa; también es útil para cualquier problema de límite de cambio que incorpora una posición característica claramente identificada en tiempos discretos, tales como límites de glaciar, orillas de los ríos, o uso de la tierra /límites de cobertura (USGS Woods Hole Coastal and Marine Science Center).

DSAS requiere de las entradas en datos vectoriales de al menos dos o más posiciones de la línea de costa y una línea base generada por el usuario en la cual se basa la herramienta para generar transectos que se generan perpendicularmente a la línea base con espaciado entre transectos especificado por el usuario así como la longitud del transecto. Los transectos de medición generados por DSAS desde la línea de base se cruzan con los vectores de la línea de costa. Los puntos de intersección proporcionaron la ubicación y el tiempo, la información utilizada para calcular las tasas de cambio, donde los valores positivos de la tasa indican acreción, y los valores negativos, erosión.

Específicamente, los resultados procedentes de DSAS son:

- 🌐 Información espacial de los transectos perpendiculares a la línea base, con un intervalo especificado por el usuario, a partir de los cuales se calculan las tasas de retroceso, incluyendo las coordenadas de intersección con las líneas de costa, y las distancias entre ellas y una línea base.

- Las velocidades de retroceso calculadas con la información de cada transecto, como la relación entre la distancia entre las líneas de costa y la ventana temporal entre ambas. Estos resultados se generan en una tabla, donde cada registro de esta tabla representa una intersección entre los transectos y las líneas base. Mientras que los campos incluyen la distancia a la línea base, y coordenadas XY de la intersección.
- Se obtiene una tabla de distancias donde cada registro corresponde a un transecto, donde se incluye la distancia entre líneas de costa y línea de costa particular a línea base.

Las tablas anteriores contienen estadísticas útiles para el análisis espacio-temporal, tales como la tasa de cambio y el movimiento neto de la línea de costa, estos dos parámetros estadísticos son los más importantes y los cuales se ajuntan a los objetivos de esta investigación. A continuación se describe cada uno de los estadísticos por DSAS según (Thierler et al., 2009):

Mediciones de distancia:

- Shoreline Change Envelope (SCE): Muestra la distancia entre las líneas más alejadas entre sí para cada transecto. Indica el dinamismo de la línea de costa sin tener en cuenta las fechas. Representa una distancia en metros, no una tasa.
- Net Shoreline Movement (NSM): Expresa el movimiento neto de la línea de costa como su nombre lo indica, reportando una distancia y no una tasa. El NSM se asocia con las fechas de solo dos líneas de costa la más antigua y la más nueva dando como resultado una distancia para cada uno de los transectos. Determina la variabilidad de la línea de costa atendiendo a la fecha inicial de toma de datos y la fecha final.

Estadística:

- End Point Rate (EPR): La tasa de cambio o de punto final hace referencia a la tasa de erosión / acreción y se calcula dividiendo la distancia de movimiento de línea de costa

por el tiempo transcurrido entre el la línea más reciente y la más antigua. Las principales ventajas del EPR son la facilidad de cálculo y el requisito mínimo de sólo dos fechas del litoral. El EPR se calcula dividiendo la distancia entre costas por el número de años que han transcurrido.

$$R = \frac{Dm}{T} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

R es la tasa,

Dm es la distancia en metros entre las dos fechas,

T es el período entre las dos posiciones de la costa.

🌐 **Linear Regression (LRR):** La regresión lineal es calculada a través de la intersección de puntos de cada transecto y la pendiente constituye la tasa del cambio expresada en metros/año. Es considerado un método fiable para predecir futuras posiciones del litoral, sin embargo, este método es susceptible a los efectos de valores atípicos y también tiende a subestimar la velocidad de cambio en relación con otras estadísticas tales como el EPR.

🌐 **Weighted Linear Regression (WLR):** La regresión lineal ponderada es un parámetro estadístico importante, ya que tiene en cuenta las incertezas asociadas a los errores como factor de ponderación en las ecuaciones de regresión. Este método se centra en los puntos de datos donde la exactitud de la posición litoral es inferior en un determinado año, puede ser utilizada para describir el comportamiento histórico de la línea de costa.

A continuación en la **Tabla 2** se muestran estudios de los cambios del litoral basados en el uso del software DSAS, principalmente utilizado para el estudio de los cambios de la línea de costa con el fin de obtener cálculos estadísticos a partir de su comportamiento como las tasas de cambio existente entre ellas.

Tabla 2. Fuentes bibliográficas sobre la aplicación de la metodología DSAS. (Elaboración propia (2019).

AUTORES / AÑO	TEMA	DESCRIPCIÓN
(Hoyos et al., 2006)	Sistema de información geográfica para el estudio de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba Colombia: Herramienta de diseño, implementación y uso. Gestión y Ambiente.	El objetivo de este artículo fue diseñar e implementar un SIG para analizar los procesos erosivos que afectan al litoral del Departamento de Córdoba, Colombia. Pues el estudio y monitoreo de factores en los procesos de erosión del litoral requieren del uso de herramientas utilizadas en SIG, en este caso se utilizó la herramienta DSAS y se presentaron sus ventajas.(Hoyos et al., 2006)
(Prieto et al., 2012)	Procesos erosivos (tasas de erosión) en los deltas mediterráneos andaluces: herramientas de análisis espacial (DSAS) y evolución temporal (servicios OGC).	En esta investigación se evaluó y cuantifico la erosión de las playas en los principales deltas de la fachada mediterránea andaluza. Metodológicamente se realizó la digitalización de la línea de costa de los años 1956, 1979, 1984, 2001 y 2009, para la obtención de las tasas de evolución de la línea de costa se utilizó DSAS integrado en ArcGis 10.
(Ahmad y Lakhan, 2012)	Análisis basado en SIG y modelado de costa, avance y retiro a lo largo de la costa de Guyana	En este trabajo se analizó, mapeo y modelo el avance y la retirada de la costa en un periodo de tiempo de 1999 a 2006, donde DSAS de utilizo para predecir las tasas de cambio de la costa. Este estudio se realizó en la costa de Guyana al sureste del continente americano.
(Cifuentes Ossa , 2017)	Detección de cambios de la línea costera al norte del distrito de Buenaventura mediante el uso de sensores remotos.	Este estudio se realizó al norte del Distrito de Buenaventura, en el Pacífico Colombiano. Con el apoyo de imágenes satelitales Landsat, donde se detectaron posiciones históricas de la línea de costa desde los años 1986 hasta 2015 con el fin de identificar los procesos de cambio, en términos de erosión y acreción. Estos datos se procesaron en DSAS obteniendo con ello las estadísticas de la tasa de cambio del periodo de estudio.
(Lee et al., 2019)	Monitoreo del movimiento de la costa y cambios geomorfológicos de playas con imágenes de Lidar y UA V en la costa del mar del este, Corea.	En este estudio se analizó el movimiento de la costa y los cambios topográficos utilizando datos de sensores remotos. Los cambios de la costa analizaron a corto (2016 - 2019) y largo plazo (2008 - 2018) y se cuantificaron estadísticamente utilizando la herramienta DSAS.

2.6. CONCEPTOS RELACIONADOS AL RIESGO COSTERO

En la práctica del manejo costero, la definición de riesgo y los conceptos relacionados a menudo aparecen como una fuente de discusión debido a que son escasas las definiciones al respecto. Por lo tanto, se procede a definir en este apartado algunos conceptos de riesgo y definiciones relacionadas disponibles en la literatura, así como también los conceptos finales adaptados al contexto de esta investigación. Comprender los conceptos de vulnerabilidad, consecuencia y riesgo es necesario para llevar a cabo la evaluación de riesgo de erosión costera.

Para el año de 1979, la Organización de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRO) y de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), propusieron un marco conceptual de riesgo donde hacen referencia a los conceptos de mayor relevancia en el análisis de riesgo los cuales pueden ser utilizados en el estudio de riesgo ante la erosión costera para profundizar en su entendimiento. De acuerdo a lo propuesto por UNDRO y UNESCO, sus conceptos pueden ser interpretados en la ecuación 1 para su evaluación:

$$R_t = E \cdot R_s = E \cdot H \cdot V \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde según (UNDRO, 1979):

“R_t” es el riesgo total: número esperado de vidas perdidas, personas lesionadas, daños a la propiedad y desorganización de la actividad económica debido a un fenómeno natural particular y, en consecuencia, el producto del riesgo específico y los elementos en riesgo.

“E” son los elementos en riesgo: población, edificios y obras de ingeniería civil, actividades económicas, servicios públicos e infraestructura, etc. en riesgo en un área determinada.

“R_s” es el riesgo específico: grado esperado de pérdida debido a un fenómeno natural en particular y en función tanto del peligro natural como de la vulnerabilidad.

“H” amenaza o peligro: probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo en un área determinada, de un fenómeno natural potencialmente dañino.

“V” es la vulnerabilidad: grado de pérdida de un elemento determinado en riesgo o un conjunto de tales elementos que se derivan de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada y expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).

(Short y Masselink, 1993) propuso incluir los elementos en riesgo en el concepto de vulnerabilidad dado que un elemento es vulnerable solo si está expuesto por lo cual modificó la ecuación original y planteó la siguiente expresión:

$$R = H.V \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

R es el riesgo total,

H es la amenaza o peligro,

V hace referencia a la vulnerabilidad.

En la actualidad existen diversos puntos de vista sobre que es “Riesgo” y estos dependen de las decisiones particulares en las áreas especializadas. Algunas definiciones acordes a esta investigación son:

El riesgo es la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, actividad económica interrumpida, o entorno dañado) como resultado de interacciones entre peligros naturales o provocados por el hombre y condiciones vulnerables (Escudero Castillo et al., 2012).

CENAPRET define el riesgo como la probabilidad de que, durante un periodo específico de tiempo, se produzcan alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales y económicos o ambientales. Mientras que las Naciones Unidas a través de la terminología establecida por la UNISDR sobre la

reducción de desastres en el 2009 define riesgo como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas (UNISDR, 2009).

Mientras que el término consecuencia se refiere al resultado no deseado en caso de que se materialice un riesgo. Podría referirse a la pérdida de hábitat, daño económico, número de vidas perdidas, etc. No reconocer el alcance espacial total de las consecuencias sesgaría el proceso de toma de decisiones y podría conducir a decisiones sub-óptimas. Las posibles consecuencias son evaluadas combinando elementos de exposición y vulnerabilidad. Representa un impacto económico como social o daño/ mejora ambiental y puede expresarse cuantitativamente, por categoría o descriptivamente (Sayers et al., 2003).

La vulnerabilidad como parte del riesgo ha cobrado gran importancia en los últimos años especialmente en las ciencias que estudian el ambiente y en relación con la sustentabilidad (Cutter et al., 2003). En la actualidad la vulnerabilidad es considerada clave para comprender el riesgo en forma integral y gestionarlo (Vittal Hegde y Radhakrishnan Reju, 2007) ya que es la característica de un sistema que describe su potencial de ser dañado independientemente del riesgo probabilístico de ocurrencia (Sarewitz et al., 2003).

Una definición más precisa de vulnerabilidad es la definida por la UNISDR como las características y circunstancias de una comunidad o sistema que lo hace susceptible a los efectos dañinos de un peligro (UNISDR, 2009). Mientras que el IPCC define a la vulnerabilidad más detalladamente como el “Grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación.” (IPCC, 2007).

La terminología para este trabajo según los conceptos antes mencionados es la siguiente:

Riesgo: resulta de la combinación de la pérdida o daño potencial que la erosión puede causar (consecuencia) y la probabilidad / intensidad de que la erosión costera afecte el área

de estudio en un periodo de tiempo dado (vulnerabilidad).

Consecuencia: daño potencial si la erosión costera afecta el área de estudio. Las consecuencias incluyen exposición para estimar la cantidad de área que se verá afectada por la erosión. La consecuencia variará dependiendo del valor presente en el área de estudio.

Vulnerabilidad: la cantidad de daño potencial causado por la erosión costera. Por lo tanto, la vulnerabilidad depende de la predisposición del suelo a erosionarse (susceptibilidad) y el valor atribuido a esa misma área. La vulnerabilidad es independiente de las condiciones de erosión costera y el nivel de exposición que afecta área de estudio.

2.7. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS COSTEROS

A pesar de todos los esfuerzos en la comunidad científica, las brechas con respecto a las evaluaciones costeras aún existen y deben abordarse. La mayoría de las metodologías desarrolladas en las dos últimas décadas se centran en el riesgo costero debido a los eventos de cambio climático como tormentas y huracanes los cuales plantean un grave problema para las sociedades costeras, dado las consecuencias potencialmente devastadoras que generan.

La metodología de evaluación costera más antigua encontrada en la literatura se presentó en IPCC CZMS en el año de 1992 por el IPCC, esta metodología llamada Metodología Común (CM, por sus siglas en inglés) es aplicable a escala global, nacional, regional o local y fue diseñada para ayudar a los países a evaluar los posibles impactos costeros del aumento del nivel del mar y medidas de adaptación que deben tenerse en cuenta (IPCC CZMS, 1992).

Desde entonces, se han desarrollado varias metodologías (**Tabla 3**), principalmente centradas en el aumento del nivel del mar (SLR) y sus consecuencias para las zonas costeras de todo el mundo, así como de vulnerabilidad costera y riesgo ante la erosión. Estas metodologías presentan una amplia gama de procesos, indicadores y alcance, tanto en tiempo como en escala espacial, para evaluar el riesgo costero, peligros y / o vulnerabilidad. Algunas de estas metodologías se explican detalladamente en las siguientes secciones de este documento.

Además de las metodologías más tradicionales para evaluar el riesgo costero, hoy en día se han desarrollado herramientas de evaluación de riesgo costero en SIG (Sistema de Información Geográfica), como la metodología CERA aplicada en esta investigación la cual se describe en la sección 3.4 de este trabajo.

Tabla 3. Revisión bibliográfica sobre metodologías de vulnerabilidad y riesgo costero (Elaboración propia (2019))

Nombre	Año	Referencia	Objetivo
Metodología común del IPCC (CM)	1991	(IPCC CZMS, 1992)	Evaluación de posibles impactos costeros del aumento del nivel del mar y medidas de adaptación.
Índice de vulnerabilidad costera (CVI)	1999	(Thieler y Hammar-Klose, 1999)	Evaluación de la vulnerabilidad relativa de la costa a cambios debido al aumento del nivel del mar.
Atlas de Nacional de Riesgos de la República Mexicana	2001	(CENAPRED-SEGOB, 2014)	Metodología Nacional para evaluar peligros y riesgos a nivel nacional, estatal y municipal.
Evaluación de vulnerabilidad Dinámica e interactiva (DIVA)	2004	(Hinkel y Klein, 2009)	Evaluación de vulnerabilidad costera para escenarios climáticos y socioeconómicos seleccionados por el usuario.
Vulnerabilidad y riesgo costero Evaluación (CVRA)	2005	(Coelho, 2005)	Evaluación de la vulnerabilidad costera y riesgo de erosión costera.
Sistema de soporte de decisiones para Impacto del cambio climático costero (DESYCO)	2005	(Torresan et al., 2016)	Evaluación de los impactos del cambio climático en zonas costeras y ecosistemas relacionados.
SimCLIM (SC)	2005	(Warrick, 2009)	Simulación de impactos biofísicos y efectos socioeconómicos de las variaciones del clima.
Smartline (SL)	2006	(Lins-de-Barros y Muehe, 2013)	Evaluación de la vulnerabilidad física y social ante la erosión costera e inundaciones y riesgo costero resultante.
TESEO DSS	2009	(Zanuttigh et al., 2014)	Evaluación de vulnerabilidad, impactos y riesgos de las zonas costeras e identificación y evaluación de costas y medidas de adaptación.
Rueda de peligro costero (CHW)	2012	(Rosendahl Appelquist et al., 2016)	Evaluación del nivel de peligro costero para escenarios de riesgo múltiple.
RISC-KIT Riesgo costero (CRAF)	2013	(Viavattene et al., 2018)	Evaluación de peligro, exposición y riesgo de zonas costeras para identificación de segmentos de alto riesgo.
CERA	2017	(Narra et al., 2017)	Evaluación del riesgo ante la erosión costera en base a la vulnerabilidad y consecuencia del área de estudio.

2.7.1. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA

El método de Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) fue introducido por (Thieler y Hammar-Klose, 1999) el cual muestra la vulnerabilidad relativa de la costa a los cambios debido al aumento del nivel del mar. El IVC es uno de los más difundidos y aplicados a lo largo de las costas del mundo (Rondón Ramírez, 2018).

Las variables para calcular el CVI, se centran en las características físicas de la costa y exposición a diversos procesos marinos (oleaje, mareas y cambio relativo del nivel del mar) (Ojeda et al., 2009). Cada uno de estos indicadores se evalúa individualmente en base a la **Tabla 4**. Después de esta evaluación se calcula el puntaje de vulnerabilidad utilizando la formula (ecuación 4).

$$CVI = \sqrt{\frac{a.b.c.d.e.f}{6}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde cada letra representa una variable diferente:

- a:** geomorfología,
- b:** pendiente costera,
- c:** tasa del aumento relativo del nivel del mar,
- d:** tasa de erosión / acreción de la costa,
- e:** rango medio de mareas,
- f:** altura media de la ola.

Por último, los datos obtenidos del CVI se dividen en cuatro categorías en base a los rangos de cuartiles del conjunto de datos obtenido. Esta clasificación se realiza a lo largo de la costa e identifica los puntos con mayor vulnerabilidad en un área de estudio dada (Narra et al., 2019).

Tabla 4. Clasificación de las variables del índice de vulnerabilidad costera para la costa atlántica de Estados (Thieler y Hammar-Klose, 1999).

Parámetros	Muy bajo 1	Bajo 2	Moderado 3	Alto 4	Muy alto 5
Geomorfología	Acantilado rocoso	Acantilados medianos	Acantilados bajos, Llanuras aluviales	Adoquín, playas, estuario, laguna	Barrera, playas de arena, marismas, deltas, manglar
Pendiente costera (%)	> 0.2	0.2 – 0.07	0.07 – 0.04	0.04 – 0.025	< 0.025
Cambio del nivel relativo del mar (mm/año)	< 1.8	1.8 – 2.5	2.5 – 2.95	2.95 – 3.16	> 3.16
Costa erosión / acreción (m / año)	> 2.0	1.0 – 2.0	-1.0 – 1.0	-1.0 - -2.0	< -2.0
Rango de marea media (m)	> 6.0	4.1 – 6.0	2.0 - 4.0	1.0 – 1.9	< 1.0
Altura media de ola (m)	< 0.55	0.55 – 0.85	0.85 – 1.05	1.05 – 1.25	> 1.25

2.7.2. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE ATLAS NACIONAL DE RIESGO

En el año de 1991 la Secretaría de Gobernación de México publicó su primer versión de “Atlas de Riesgos”, hoy en día la contribución más relevante para la evaluación de riesgos en México está siendo desarrollado por el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED), algunas de sus publicaciones más importantes son “Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en la República Mexicana”(CENAPRED-SEGOB, 2014) y la “Guía básica para la elaboración del Atlas estatal y municipal de riesgos y peligros” (CENAPRED, 2006).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) se ha encomendado el desarrollo del “Atlas Nacional de Riesgos” (ANR) con el objetivo de establecer una metodología nacional para evaluar riesgos hidrometeorológicos en zonas costeras (Escudero Castillo et al., 2012).

El ANR se concibe como una herramienta estratégica que permita la integración de información sobre peligros y riesgos a nivel estatal y municipal en una plataforma informática homogénea, dinámica y transparente utilizando las herramientas actuales para el manejo de información, así como los avances logrados en la identificación del peligro y el desarrollo de modelos para su representación, cambiando el enfoque tradicional de un Atlas de Riesgos, de ser una colección de mapas, a un sistema integral de información que permita evaluar el riesgo de desastres a diferentes niveles y escalas, apoyando la realización de simulaciones y escenarios, y muy importante, que pueda ser actualizado fácilmente y se mantenga vigente. Según (CENAPRED, 2006) la metodología simplificada es la siguiente:

- 🌐 Identificación de los fenómenos naturales y antrópicos que pueden afectar una zona en estudio como: Fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, químicos; sanitario-ambientales y Socio-organizativos.
- 🌐 Determinación del peligro asociado a los fenómenos identificados el cual consiste en obtener una descripción probabilística de la posible ocurrencia de dichos eventos perturbadores con distintas intensidades.
- 🌐 Identificación de los sistemas expuestos y su vulnerabilidad utilizando métodos cuantitativos que requieren el empleo de expresiones matemáticas llamadas funciones de vulnerabilidad, que relacionan las consecuencias probables de un fenómeno sobre una construcción, una obra de ingeniería, o un conjunto de bienes o sistemas expuestos con la intensidad del fenómeno que podría generarlas.
- 🌐 Evaluación de los diferentes niveles de riesgo asociado a cada tipo de fenómeno, tanto natural como antropogénico con herramientas para la toma de decisiones como la construcción de escenarios en los que se detecten las zonas con altos niveles de riesgo.
- 🌐 Integración sistemática de la información sobre los fenómenos naturales y antropogénicos, peligro, vulnerabilidad y riesgo considerando los recursos técnicos y humanos.

2.7.3. ENFOQUE SMARTLINE (SL)

El enfoque Smartline fue introducido por primera vez por (Sharples, 2006) con el objetivo inicial de crear una base de datos de geomorfología costera para la costa de Tasmania, Australia, aunque más adelante este método se aplicó para toda la costa australiana. El objetivo era crear una escala nacional de accidentes geográficos costeros con un formato y clasificación consistentes, utilizando Sistemas de información Geográfica, que se utilizarían para la evaluación de vulnerabilidad costera (Sharples et al., 2009). Este autor describe la evaluación de la vulnerabilidad como un complemento de tres niveles de detalle y confianza definidos a continuación:

El primer nivel es llamado por el autor como *factores de vulnerabilidad fundamentales* el cual se basa en identificar las costas cuyas características geológicas y geomorfológicas pueden hacer potencialmente vulnerables a las costas en peligro. Mientras que el segundo nivel es una *evaluación regional* y utiliza los datos disponibles sobre características de la zona costera, como clima de olas, rango de marea y datos geomorfológicos para desarrollar una clasificación inicial de diferentes grados de vulnerabilidad a lo largo de grandes tramos de la costa. Por último, el tercer nivel es una *evaluación específica del sitio*, que identifica todos los datos geológicos relevantes, geomorfológicos, topográficos, oceanográficos y climáticos que influyen en un sistema costero para evaluar la vulnerabilidad costera a escala local.

Al aplicar esta metodología el autor optó por dividir la costa en segmentos de acuerdo con características tales como mar adentro, intermareal y tipo de geología, de igual manera los resultados se representaron a través de una línea a lo largo de la costa en lugar de un polígono, debido a que este formato de mapa lineal permite la creación de un mapa costero completo mucho más rápido de lo que hubiera sido posible a través del mapeo poligonal.

El enfoque Smartline fue aplicado en un tramo de la costa del estado de Río de Janeiro, Brasil por (Lins-de-barros y Muehe, 2010; Lins-de-Barros y Muehe, 2013) los cuales adaptaron el enfoque SL para evaluar la vulnerabilidad física y social y posteriormente combinarlos para obtener el riesgo costero de la zona. (Narra et al., 2019) también aplicó este método SL al

igual que otras metodologías para tres áreas de estudio en Aveiro, Portugal, Macaneta, Mozambique y Quintana Roo, México con el fin de hacer una comparación entre ellas.

2.7.4. RUEDA DE PELIGRO COSTERO (CHW)

La Rueda de peligro costero (Coastal Hazard Wheel) es un sistema universal de apoyo a la clasificación y gestión costera para su uso a nivel local, regional y nacional. La aplicación CHW es una aplicación automatizada la cual utiliza el CHW que se puede utilizar para clasificar una ubicación costera particular, determinar su perfil de peligro, identificar opciones de gestión relevantes y comunicar información costera (Rueda de peligro costero). Este sistema busca ser un alternativa a evaluaciones complejas de amenazas costeras que a menudo requieren una gran cantidad de datos de entrada y conocimiento experto (Appelquist, 2015).

CHW 3.0 está representado por un círculo (**Figura 2**) (Rosendahl Appelquist et al., 2016) y distingue entre 131 ambientes costeros genéricos que representan una combinación única de las seis variables bio-geofísicas considerados más importantes para el carácter de un entorno costero. Los parámetros incluidos son: disposición geológica, exposición a las olas, rango de mareas, flora / fauna, balance de sedimentos y clima de tormenta (Stronkhorst et al., 2018).

Una combinación de estas variables devuelve un entorno costero único que tiene un nivel de peligro entre 1 (bajo) y 4 (muy alto) para cada tipo de peligro. El nivel de peligro es una indicación general de la presencia de peligro en ese entorno costero. La evaluación de riesgos no forma parte del CHW y se agrega para dar sentido al peligro. Es una indicación general del riesgo en el área (Rueda de peligro costero).

Este método ha sido aplicado en las costas de Aveiro, Portugal (Narra et al., 2019) donde se definió a Aveiro como un área altamente amenazado por la erosión, y en las costas del caribe y el pacifico colombiano (Stronkhorst et al., 2018) donde se reveló un riesgo de erosión de alto a muy alto en el 47% de la costa del Caribe y en el 23% de la costa del Pacífico.

CHW 3.0 está representado por un círculo (Rosendahl Appelquist et al., 2016) que consta de seis indicadores: *geológicos*, *exposición al oleaje*, *rango de marea*, *vegetación*, *sedimento* *equilibrio* y *clima de tormenta*. La clasificación de un determinado litoral el área se realiza clasificando secuencialmente cada indicador, comenzando en el centro del círculo con cada peligro clasificado de 1 a 4 (bajo, moderado, alto y muy alto). El CHW distingue entre 131 combinaciones de ambientes costeros y escenarios y atribuye una clasificación para cada uno. Los peligros que podrían evaluarse utilizando esta metodología son la alteración del ecosistema, la inundación gradual, intrusión de agua salada, erosión e inundaciones.

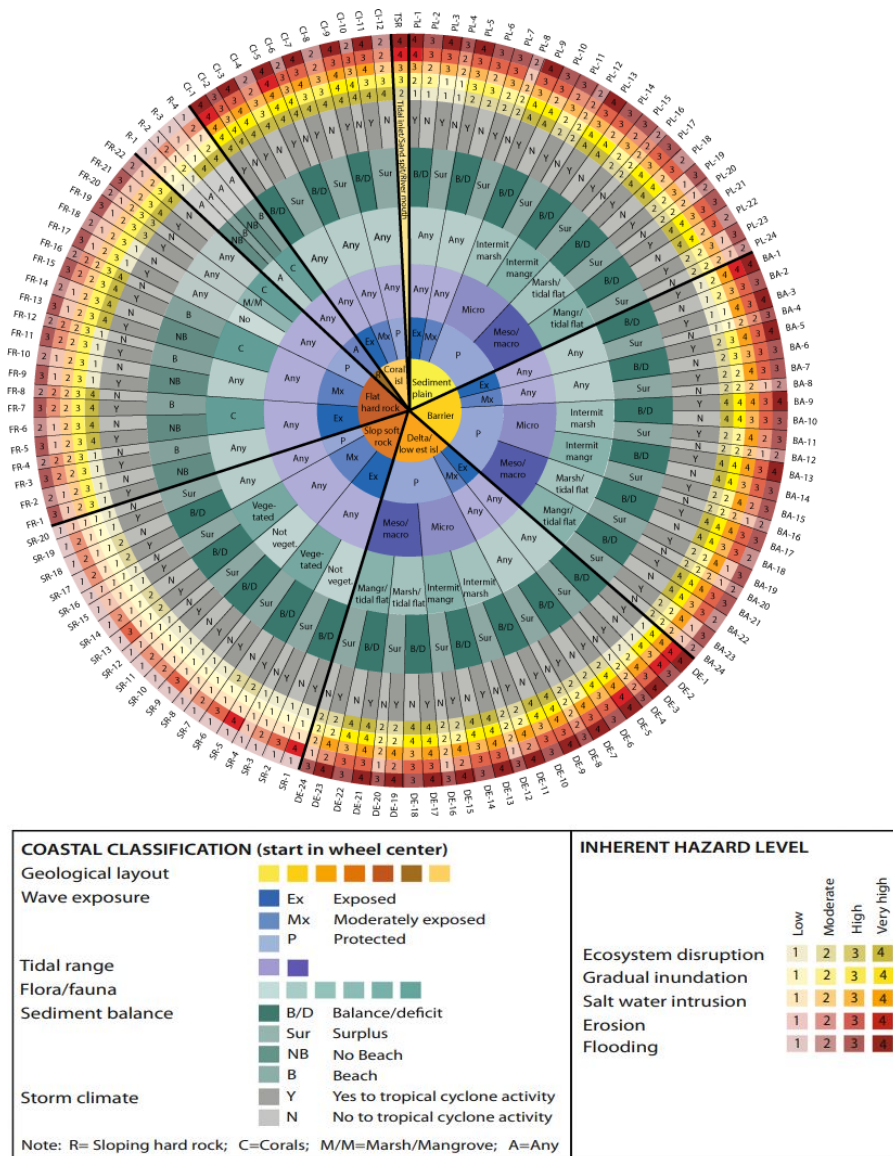


Figura 2. Rueda de Peligo Costero. Fuente: (Appelquist et al., 2016)

2.8. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN COSTERA: CERA

El objetivo principal de esta metodología CERA propuesta por (Narra et al., 2017) es la evaluación de riesgo ante la erosión costera a partir de una estimación cualitativa de evaluación de la vulnerabilidad de la zona costera ante la erosión la cual se centra en las características geofísicas de la zona costera y el potencial de los agentes erosivos. Y el análisis de las consecuencias del suceso peligroso, teniendo en cuenta los aspectos sociales, ambientales, culturales y económicos del territorio. Los resultados de estos dos análisis se combinan para obtener el resultado final buscado por CERA que es obtener el mapa de riesgo ante la erosión costera.

CERA es un complemento de QGIS (2016) (**Figura 3**) el cual se basa en la metodología CVRA de (Coelho, 2005), que considera la combinación de dos factores que son vulnerabilidad y consecuencia para obtener un mapa georreferenciado de riesgo; considera nueve parámetros ponderados relacionados con el peligro para la vulnerabilidad y cuatro parámetros más relacionados con las consecuencias. Estos mismos parámetros son considerados por CERA solo que fueron ligeramente cambiados o reformulados por Narra et al., (2017) para ser más específico o para incluir otras situaciones que Coelho, (2005) no consideraba. Esta herramienta está disponible en GitHub (2016) en <http://www.github.com/NEFEC-UA/CERA> por (Narra et al., 2017).

Los nueve parámetros para el cálculo de la vulnerabilidad costera son: distancia a la costa (distancia lineal más corta desde cualquier punto de tierra hasta la costa), topografía, geología, geomorfología, cobertura del suelo, acciones antropogénicas, altura máxima de ola significativa (dentro de un representante período de datos), rango máximo de marea y tasa de erosión / acreción, a los cuales se les atribuye una clasificación del 1 al 5 en base a la **Tabla 5**. La vulnerabilidad en cada punto se calcula mediante el cálculo de la media ponderada de los pesos de los nueve parámetros en base a lo establecido por (Narra et al., 2017).

El cálculo de las consecuencias se realiza similar al de vulnerabilidad, pero incluye solo cuatro parámetros: densidad de población, economía, ecología y patrimonio, de igual manera estos

parámetros se clasifican del 1 al 5 en base a la **Tabla 5**. Para obtener el mapa de consecuencias, el promedio de estos 4 parámetros se calcula.

CERA (Coastal Erosion Risk Assessment)

Vulnerability Parameters:

		100m	5000m
Distance to Shoreline:	Distance_to_shoreline	0.214	0.880
Topography:	Topography_area	0.214	0.033
Geology:	Geology	0.214	0.033
Geomorphology:	geomorphology1	0.071	0.011
Ground Cover:	Ground_Cover1	0.071	0.011
Anthropogenic Actions:	Antropogenic_Ac1	0.037	0.005
Maximum Significant Wave Height:	Maximum_sig_wave_height_1	0.071	0.011
Average Erosion/Accretion Rates:	Erosion_accretion_rates	0.037	0.005
Maximum Tidal Range:	Maximum_tidal_range	0.071	0.011

Consequence Parameters:

Population Density: Population_density

Economic Activity: Economy

Ecology: Ecology2

Heritage: Heritage1

Output Files

Select output for risk map: /tesis2019/Zona_norte/Costa_Estudio.tif

Execute

Close

Figura 3. Interfaz gráfica de CERA.

Para obtener el mapa de riesgo de erosión costera, los mapas de vulnerabilidad y consecuencia se combinan utilizando la matriz de riesgo se presentan en la **Figura 4**. El riesgo se define en 5 clases diferentes: “I” representa el riesgo muy bajo y “V” riesgo muy alto. La matriz de riesgo es simétrica, teniendo en cuenta tanto la vulnerabilidad como la consecuencia con la misma importancia (Narra et al., 2017).

		Consecuencia				
		I	II	III	IV	V
Vulnerabilidad	I	I	I	I Muy bajo	II	III
	II	I	II	II Bajo	III	IV
	III	I	II	III Moderado	IV	V
	IV	II	III	IV Alto	IV	V
	V	III	IV	V Muy alto	V	V

Figura 4. Matriz de riesgo utilizada por CERA (Narra et al., 2017).

Tabla 5. Clasificación de parámetros para CERA (En base a (Narra et al., 2017)).

Parámetros	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
	1	2	3	4	5
Distancia a la costa (m)	> 1000	[500,1000]	[300,500]	[150,300]	≤ 150
Topografía (m)	> 30	[20,30]	[10,20]	[5,10]	≤ 5
Geología	Rocas magmáticas	Rocas metamórficas	Rocas sedimentarias	Sedimentos gruesos no consolidados	Sedimentos finos no consolidados
Geomorfología	Montañas	Acantilados de roca	Acantilados erosivos; playas protegidas; dunas	Playas expuestas; llanuras costeras	Desembocaduras de los ríos; estuarios
Cobertura del suelo	Bosque	La vegetación cultivada	No cubierta	Urbanizada rural	Urbanizada; industrial
Acciones antropogénicas	La intervención estabilización de la costa	Intervención sin reducción de las fuentes de sedimentos	La intervención con las fuentes de sedimentos	Sin intervenciones o fuentes de sedimentos reducción	Sin la intervención y con la reducción de las fuentes de sedimentos
Altura máxima de ola significativa (m)	<3,0	[3.0,5.0]	[5.0,6.0]	[6.0,6.9]	≥ 6,9
Rango máximo de marea (m)	<1,0	[1.0,2.0]	[2.0,4.0]	[4.0,6.0]	≥ 6,0
Tasa promedio De erosión / acreción (m / año)	> 0.0 Acreción	[0,0, -1,0] Erosión	[-1,0, -3,0] Erosión	[-3,0, -5,0] Erosión	≤ -5.0 Erosión
Densidad de población (habitantes / km²)	<125	[125, 250]	[250, 500]	[500,1000]	≥ 1000
Economía (número de empleos)	0	[0, 120]	[120, 240]	[240, 480]	> 480
Ecología	Sin relevancia ecológica	Reserva agrícola; áreas de interés de la comunidad	Área protegida ecológica	Zona de protección costera	Reserva natural
Patrimonio	No patrimonio	Casas dispersas; carreteras	Los asentamientos urbanos	Edificios históricos regionales; instalaciones	Monumentos nacionales

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE

El procedimiento para determinar la línea de costa a partir de las imágenes satelitales consistió en los siguientes pasos primordiales: búsqueda y descarga de imágenes satelitales desde internet y procesamiento de las imágenes satelitales para la posterior digitalización de la línea de costa. Las imágenes satelitales descargadas fueron de la constelación Landsat con las siguientes fechas de adquisición: 1981, 1993, 2004, 2016 y 2018, todas correspondientes al mes de octubre. Estas imágenes fueron consultadas y descargadas desde la base de datos oficiales de acceso libre en internet: <http://earthexplorer.usgs.gov/> . Los datos de descarga fueron de la Colección Landsat 1 Nivel-1, debido a que esta información cumple con los criterios formales de calidad geométrica y radiométrica (USGS EROS, 2019).

Los procesos realizados en esta etapa fueron fundamentales para preparar las imágenes y poder realizar la digitalización de las líneas de la costa para la zona de estudio. Como primer paso se realizó la ratificación de la proyección cartográfica correspondiente a la zona de estudio, en nuestro caso a la UTM en la Zona 12 Norte en el elipsoide WGS84. Otro paso importante fue la selección de las bandas multiespectrales que lograran una mejor separación de la frontera tierra/agua. Las imágenes utilizadas para la digitalización de la línea de costa fueron las combinaciones de las bandas rojas e infrarrojas (**Tabla 6**). Estas combinaciones se basaron en la recomendación de (Franco, 2017) el cual menciona que la combinación de las bandas 5 (IRc)-R, 6 (SWIR 1)-G y 4 (Rojo)-B de Landsat 8 es la que logra una mejor separación de la frontera tierra / agua. Esta combinación se tomó como base para guiarse en las combinaciones que se realizaron de las otras fechas de las imágenes debido a que se obtuvieron de diferentes satélites y por lo tanto las bandas utilizadas variaron un poco.

Tabla 6. Combinaciones realizadas con las bandas multiespectrales. (Elaboración propia (2017))

Satélite-sensor	Resolución (m)	Día de adquisición	RMSE (m)	Combinación RGB
Landsat 2- MSS	80	10-Oct-1981	18	6 (IR) próximo
Landsat 5-TM	30	21-Oct-1993	5	4(IRc), 5(SWIR-1) y 3(Rojo)
Landsat 5-TM	30	03-Oct-2004	4	4(IRc), 5(SWIR-1) y 3(Rojo)
Landsat 8-OLI	30	04-Oct-2016	8	5(IRc), 6(SWIR-1) y 4 (Rojo)
Landsat 8-OLI	30	26-Oct-2018	7	5(IRc), 6(SWIR-1) y 4 (Rojo)

3.2. DIGITALIZACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Las posiciones de las líneas de costa pueden hacer referencia a varias características, tales como la línea de vegetación, la línea de agua alta, la línea de agua baja y la línea de mojado / seco entre otras. La posición de la línea de costa en esta investigación se obtuvo localizando la línea que se forma en el límite entre tierra y mar basándonos en la característica de mojado / seco, ya que marca el límite superior del foreshore y determina el comienzo de la playa alta o playa seca (Ojeda Zújar, 2000). Dicha línea se digitalizó a partir de cada una de las imágenes obtenidas de la combinación de bandas multiespectrales seleccionadas (**Tabla 6**) de las imágenes satelitales históricas de la constelación Landsat.

Para digitalizar la línea de costa se crearon entidades tipo polilínea en SIG ArcMar®. La utilización de este tipo de entidades permitió el uso de la aplicación DSAS para calcular el cambio en la línea de costa. Esto último es posible si se utilizan como proyección un sistema cartesiano (coordenadas XY en metros).

La digitalización de las líneas de costa se realizó entre escalas de 1:10,000 – 1:15,000 en base a lo concluido por (Jurado y Fernández-Díaz, 2018) el cual menciona que la escala no debe ser constante a lo largo de una línea de costa amplia y que resulta más apropiado elegir la escala de digitalización en función de las necesidades de precisión del objeto vectorial y de las características de dicho objeto.

3.3. ANÁLISIS MULTI-TEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA MEDIANTE DSAS

Este análisis se realizó en base a las líneas de costa obtenidas de la digitalización de las imágenes satelitales para los siguientes periodos:

- 🌐 Periodo decadal: 1981 – 1993, 1993 - 2004 y 2004 - 2016
- 🌐 Periodo a corto plazo: 2016 - 2018
- 🌐 Periodo a largo plazo: 1981 - 2018

La línea base se generó como una línea paralela a la línea de costa de 1981 aproximadamente a 100 m hacia el mar, que sirvió como un punto de partida para los transectos perpendiculares emitidos. Los transectos tienen una longitud de 500 m y se generaron con un intervalo de 50 m, a lo largo de la línea de costa, sin embargo se realizó una verificación manual de la serie de transectos dadas automáticamente por DSAS ya que el espaciamiento de los transectos pueden ser requeridos de diferente manera para cada sitio específico y es una tarea subjetiva pues si el número de transectos no es la adecuada, puede conducir a una sobreestimación o subestimación de las estadísticas de los tipos de cambio (Kallepalli et al., 2017). Finalmente, de acuerdo con los datos obtenidos de la tasa de cambio en la playa, se clasificó como muy alta erosión, alta erosión, muy baja erosión, baja erosión y acreción.

Para poder comprender el análisis realizado con esta herramienta se precisan las siguientes partes fundamentales de este método en base a lo señalado por (Thierler et al., 2009) y la manera de obtención de cada uno de ellos.

3.3.1. GEODATABASE.

Todos los datos de entrada DSAS se gestionaron dentro de una geodatabase personal, la cual es una base de datos de Microsoft Access que puede almacenar, consultar y administrar tanto datos espaciales como datos no espaciales. Se usó como lugar de almacenamiento para la clase de entidad transecto, generadas por el programa y las tablas de resultados estadísticos relacionados. La geodatabase no sólo sirvió como un contenedor de almacenamiento para

todos los datos utilizados y producidos por DSAS sino que proporcionó una estructura de datos que permitió la aplicación de la topología, lo que significa que las relaciones espaciales entre las clases de entidad pueden ser aplicadas.

3.3.2. LÍNEAS DE COSTA.

Todos los datos de la línea de costa se almacenaron en una sola clase de entidad en la geodatabase personal. DSAS también requirió que la clase de entidad fuera en unidades de metros en un sistema de coordenadas proyectado (UTM en nuestro caso) y que cumpliera con los requisitos en los campos de atributo sugeridos en DSAS (**Tabla 7**).

Cada vector de la costa representa una posición específica en el tiempo y la asignación de la fecha fue muy importante para el presente estudio por lo cual se creó un campo para “DATE_” puesto que las fechas de las líneas deben expresarse como mes/día/año, así que se le asignó la fecha en el formato adecuado en la tabla de atributos. También se creó el campo “UNCERTAINTY” que representa el error que tienen las líneas digitalizadas; en el caso de estudio se decidió asignar como incertidumbre el RMSE de cada imagen de donde se digitalizó cada una de las líneas costeras.

Los transectos de medición que generó DSAS desde la línea base se cruzan con los vectores de línea de costa. Los puntos de intersección proporcionan la ubicación y el tiempo, información que se utilizó para calcular las tasas de cambio. Las distancias desde la línea base para cada punto de intersección a lo largo de un transecto se utilizan para calcular las estadísticas seleccionadas.

Tabla 7. Requerimientos de las líneas de costa. (Thierler et al., 2009)

Nombre del campo	Tipo de datos		
OBJECTID	Object ID	Auto generado	
SHAPE	Geometría	Auto generado	
SHAPE_Length	Doble	Auto generado	Longitud = 10
DATE_	Texto	Creado por el usuario	Longitud = 20
UNCERTAINTY	Cualquier campo numérico	Creado por el usuario	

3.3.3. LÍNEA BASE.

Se tomó la línea más antigua (1981) obtenida de la digitalización de las imágenes como la línea de referencia para la creación de la línea base la cual sirvió como el punto de partida para todos los transectos emitidos por la aplicación DSAS (**Figura 5**). Los transectos se cortaron entre costa en los puntos de medición utilizados para calcular las tasas de cambio de línea de costa. En este estudio la línea base se creó como un nuevo shapefile de polilínea en la geodatabase personal aproximadamente a 100 metros hacia el mar. Una vez creada la línea base, se procedió a asignar un valor de “1” al campo “ID” puesto que este campo, para el análisis con DSAS, debe de ser distinto de 0 para que el complemento la reconozca.



Figura 5. Línea base creada para la zona de estudio.

Para la construcción de la línea base adecuada se crearon los campos necesarios, dentro de la clase de entidad de la línea base (**Tabla 8**). Esta línea base proporciona la información necesaria para DSAS sobre el orden de las líneas de costa y de sus transectos, así como la ubicación de la línea base (terrestre o marítima) con respecto a las líneas de costa. Esta información se incorpora a los cálculos de modo que las estadísticas de tasa de cambio denotan adecuadamente la erosión como negativo y la acreción como positivo.

Tabla 8. Requerimientos de los campos de atributo para la línea base. (Thierler et al., 2009)

Nombre del campo	Tipo de datos		
OBJECTID	Object ID	Auto generado	Necesario
SHAPE	Geometría	Auto generado	Necesario
SAHPE_Length	Doble	Auto generado	Necesario
ID	Entero largo	Creado por el usuario	Necesario
Group	Entero largo	Creado por el usuario	Opcional
OFFshore	Entero corto	Creado por el usuario	Opcional
CasDir	Entero corto	Creado por el usuario	Opcional

3.3.4. TRANSECTOS.

Los transectos se generaron a partir de la línea base perpendiculares a las líneas de costa, distribuidos de forma equidistante a largo de la línea base, los cuales permitieron medir las diferencias de distancia registradas entre las intersecciones con las diferentes líneas de costa y la línea base. Se optó por distribuir los transectos con una separación de 50m entre ellos, asegurando que los transectos de 500m de longitud, tienen una longitud suficiente para intersectar todas las líneas de costa.

Los transectos se crearon automáticamente por la herramienta DSAS y fue necesario definir los parámetros en la ventana que incluye el software. Además de las distancias de separación y de longitud de los transectos, también se indicó en la ventana de selección los parámetros de la línea base; en este caso offshore.

Una vez ya generados todos los atributos necesarios para llevar a cabo el análisis con DSAS, se obtuvo un conjunto de líneas de costa referenciadas espacial y temporalmente que son cruzadas por cada uno de los transectos determinados que surgen de la línea base, previamente construida. La distancia desde la línea base para cada punto de medición se utiliza en conjunción con la fecha de la línea de costa correspondiente para calcular las estadísticas de las tasas de cambio.

3.4. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN COSTERA: CERA

El riesgo costero, la vulnerabilidad y las posibles consecuencias del área de estudio se obtuvieron usando una herramienta SIG de código abierto denominada CERA (Evaluación del riesgo de erosión costera) realizada por (Narra et al., 2017). Esta metodología es fácil de utilizar, pero los datos para realizarla son una limitante considerable ya que se necesitan mapas digitales georreferenciados. Por tal motivo se necesita generar una base de datos, por lo cual se recolectaron datos de diversas fuentes para cada uno de los parámetros lo cual implicó un sin número de procesos en softwares especializados (ArcGis, Quantum GIS).

CERA requirió de 13 parámetros representados en mapas digitales georreferenciados, denominados mapas indicadores:

- 1.- Distancia a la costa.
- 2.- Topografía.
- 3.- Geología.
- 4.- Geomorfología.
- 5.- Uso de suelo.
- 6.- Acciones antropogénicas.
- 7.- Altura máxima de ola significativa.
- 8.- Rango máximo de marea.
- 9.- Tasa promedio de erosión / acreción.
- 10.- Densidad de población.
- 11.- Economía.
- 12.- Ecología.
- 13.- Patrimonio.

Los datos utilizados se cortaron tierra adentro 2 km cubriendo una franja costera y no solo una línea costera como la mayoría de los métodos. El Sistema de coordenadas de referencia (CRS) establecido fue WGS84 / UTM zona 12N (EPSG: 32612) para todos los mapas, lo que permitió la combinación de datos entre ellos.

3.4.1. RECOLECCIÓN DE LOS DATOS.

Para generar el mapa Topográfico del área de estudio se utilizó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) de la base de datos de INEGI. Este conjunto de datos representa las elevaciones del territorio continental mexicano, con una resolución de 15 metros, su sistema de referencia es ITRF92 y su año de publicación es 2013. Los mapas de Máxima altura de ola significativa se realizaron en base a información del Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM) del nodo PAC17MX desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (Montoya-Rodríguez, 2016). Mientras que, para la creación de los mapas de rango de marea máxima, los datos fueron solicitados a la Secretaria de Marina (SEMAR) los cuales fueron de la Estación Mareográfica de Topolobampo.

La evaluación de uso de suelo se basó en información geoespacial de INEGI a partir de datos de uso de suelo y vegetación; de igual manera los mapas geológicos se realizaron en base a GLiM (Global lithological map) e información de INEGI al igual que el geomorfológico con mapas fisiográficos e inspección visual de imágenes de satélite de google Earth. La información requerida para los parámetros de densidad de población y economía también se obtuvo de la base de datos de INEGI correspondiente al Censo del 2010.

Los mapas de clasificación de la tasa de cambio erosión / acreción, se generaron a partir de la digitalización de la costa de imágenes satelitales Landsat (1981, 1993, 2004, 2016 y 2018). La línea de costa del año 2018 fue la que se utilizó como base para la creación del mapa de distancia a la costa. Los datos utilizados para generar los mapas de ecología consideran áreas protegidas definidas por CONANP. Para el mapa de acciones antropogénicas se utilizaron imágenes satelitales donde se identificó si existen estructuras de defensas costeras, y el análisis de la tasa de cambio de la línea de costa para inferir si hay fuentes sedimentarias cercanas. De igual manera para el mapa de patrimonio se realizó mediante análisis visual de imágenes de satélite identificando si existen áreas urbanas continuas o discontinuas, carreteras, monumentos históricos o importantes cerca de la costa.

3.4.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.

El método CERA requirió del procesamiento de datos para crear los mapas indicadores, los cuales se obtuvieron a partir de la transformación directa de datos originales obteniendo mapas raster clasificados del 1 al 5. Los cinco niveles para clasificar los mapas indicadores necesarios para ejecutar la aplicación CERA se presentan en la **Tabla 5** del Capítulo 2.

El mapa de riesgo se obtuvo con tres clases diferentes de cinco y se generó a partir de la combinación de la evaluación de la vulnerabilidad y consecuencia utilizando la matriz de riesgo presentada en la **Figura 4** del capítulo 2. Para evaluar la vulnerabilidad fue necesario tener mapas indicadores con clases del 1 al 5. Al tener los mapas indicadores y ejecutar CERA estos se combinaron usando la calculadora raster de acuerdo con el promedio ponderado publicado en (Narra et al., 2017). A los mapas indicadores para la evaluación de la consecuencia también se les asignó clases de 1 al 5. El mapa de consecuencias se obtuvo a partir del promedio de los cuatro mapas los cuales tiene el mismo peso. Los mapas resultantes de CERA se representaron en números romanos del I al V para diferenciar de los mapas indicadores.

La información obtenida para la generación de los mapas indicadores para evaluar la vulnerabilidad se basó tanto en datos actuales como históricos, según como fuese requerido por cada parámetro, como por ejemplo el indicador de distancia a la costa para el área de estudio se desarrolló en base a la línea de costa del año 2018 obtenida a partir de la digitalización de la imagen a falso color de ese año, dicho archivo se utilizó para calcular el mapa de distancia raster, utilizando análisis de proximidad en ArcGis, (**Figura 6**) esta herramienta produce un mapa con valores de distancia desde una entidad seleccionada, en nuestro caso, la costa del área de estudio del año 2018; la resolución de salida para este mapa fue de 5 m/px en base a lo indicado por el autor de CERA, el cual realizó diversas pruebas y concluyó que esta es la resolución más aceptable debido a que proporciona un razonable tiempo de cálculo sin comprometer el detalle de los datos de ningún otro mapa indicador, por tal motivo todos los mapas indicadores se crearon en esta resolución.

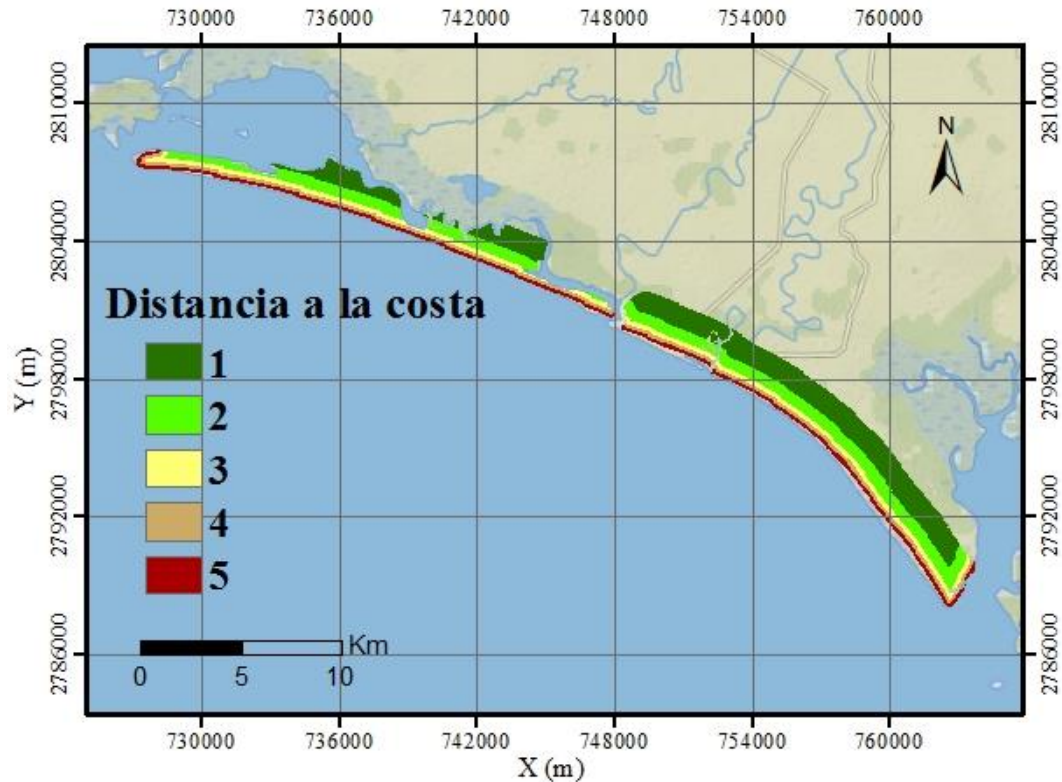


Figura 6. Mapa indicador de Distancia a la costa, para el cálculo de vulnerabilidad.

El mapa indicador de la clasificación topográfica se realizó con el uso de herramientas de extracción de ArcGis para el área de estudio a partir del CEM, claro sin antes haber realizado la transformación de coordenadas correspondiente a la WGS84-UTM-12N, posterior a esto se realizó una reclasificación de los datos para definir las clases de topografía (**Figura 7**).

En el mapa geológico se observó que prácticamente toda la costa en estudio está compuesta de sedimentos no consolidados, por lo cual el mapa resultante se clasificó en clase muy alta (**Figura 8**). Para el mapa de geomorfología se realizó un análisis integral de su fisiografía e inspección visual de imágenes para identificar las características geomorfológicas como: montañas, acantilados, playas protegidas o expuestas, llanuras costeras, dunas y desembocaduras de ríos, por lo cual según las características de la zona de estudio se clasificó en clase alta y muy alta. (**Figura 9**)

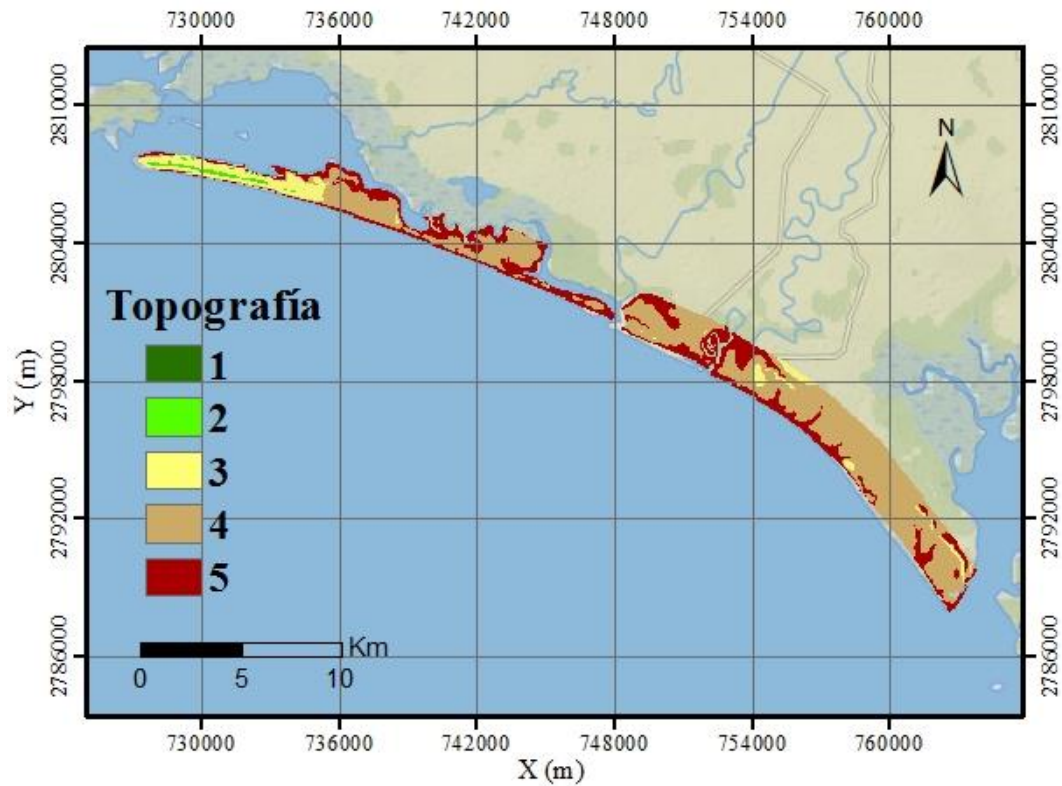


Figura 7. Mapa indicador de Topografía, para el cálculo de vulnerabilidad.

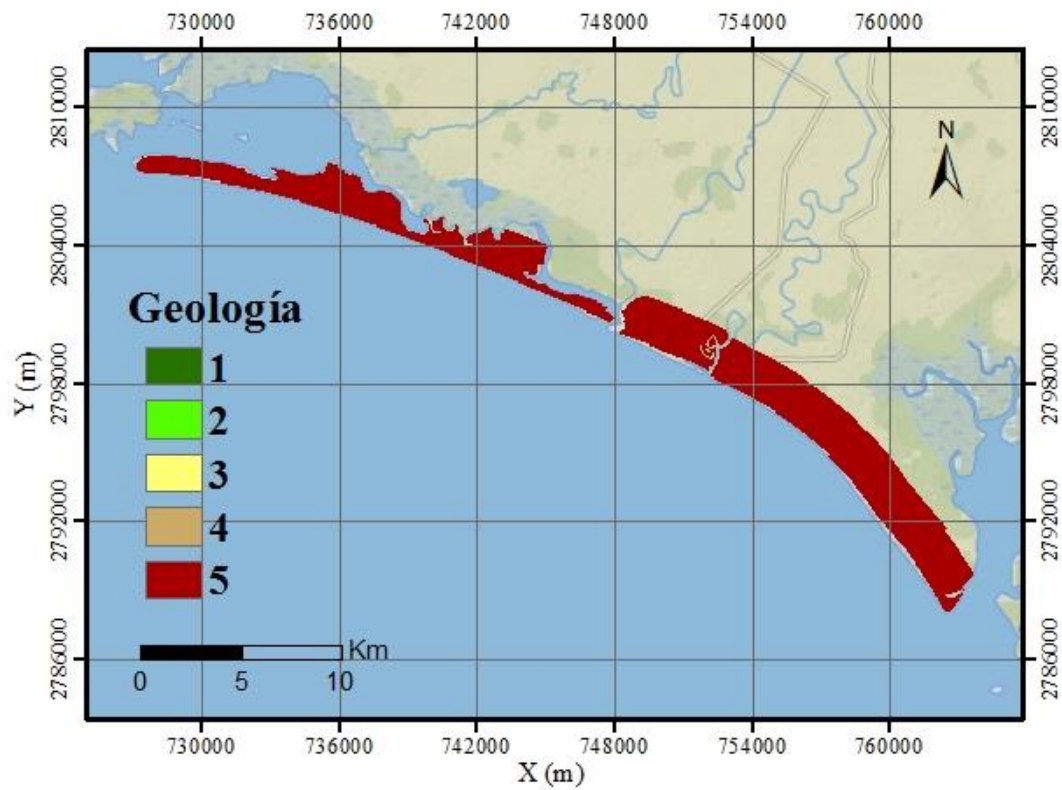


Figura 8. Mapa indicador de Geología, para el cálculo de vulnerabilidad.

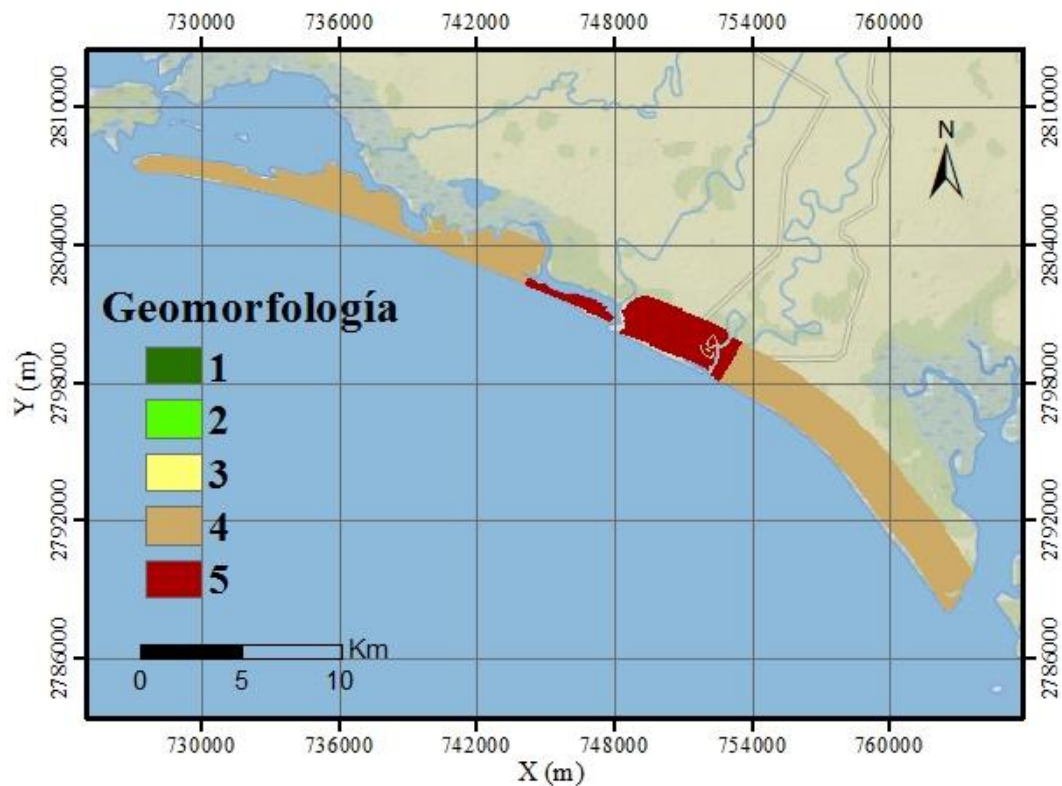


Figura 9. Mapa indicador de Geomorfología, para el cálculo de vulnerabilidad.

En la clasificación de la cobertura de suelo (**Figura 10**) se identificó si existían bosques, cultivos, zonas con poca o nula vegetación y zonas rurales o áreas urbanizadas, siendo solo la clase moderada y alta las que se identificaron en este mapa.

Para el mapa de acciones antropogénicas se idéntico si existía cualquier intervención del ser humano o no, tales como la existencia de protecciones costeras o presas, construcciones habitacionales, y si la posición de la línea de costa se encontraba estable o no, lo cual se realizó basándonos en los resultados obtenidos por DSAS, donde se identificó a partir del NSM la variabilidad de la línea costera. Al analizar estas dos variables se identificaron franjas con intervención y sin reducción de sedimentos, intervención y con reducción de sedimentos, y sin intervención y con reducción de sedimentos. En base a este análisis el mapa de acciones antropogénicas se optó por clasificarlo en: baja, moderada y muy alta (**Figura 11**).

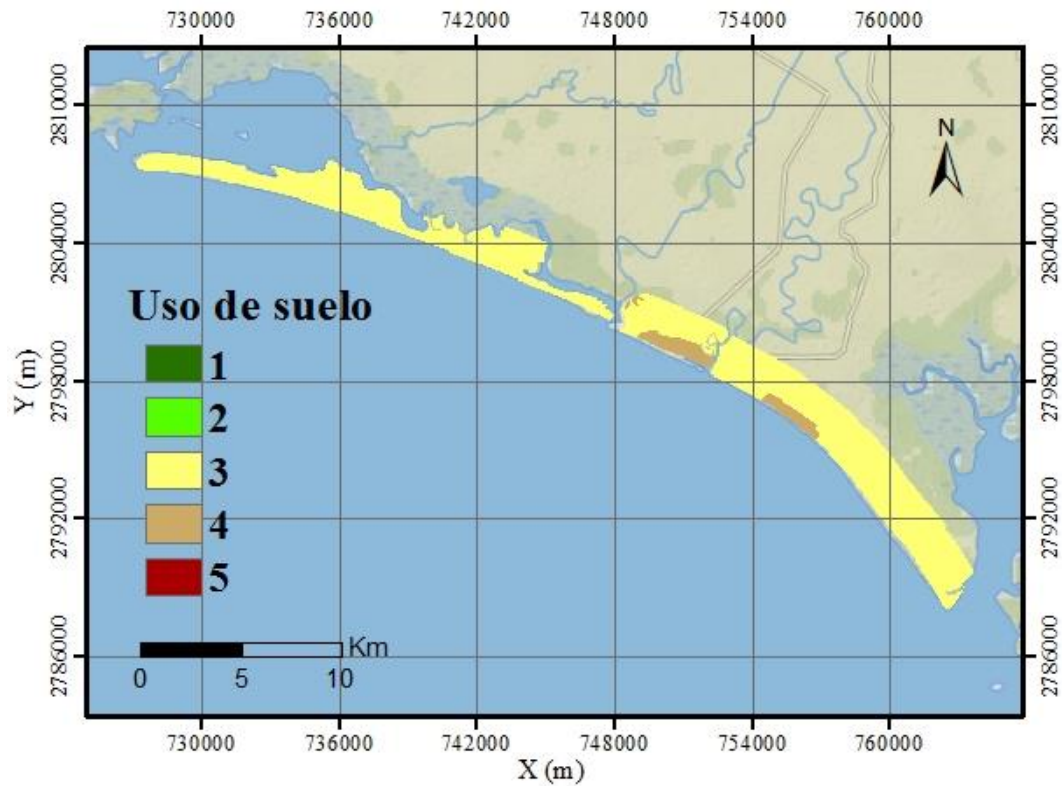


Figura 10. Mapa indicador de Uso de suelo, para el cálculo de vulnerabilidad.

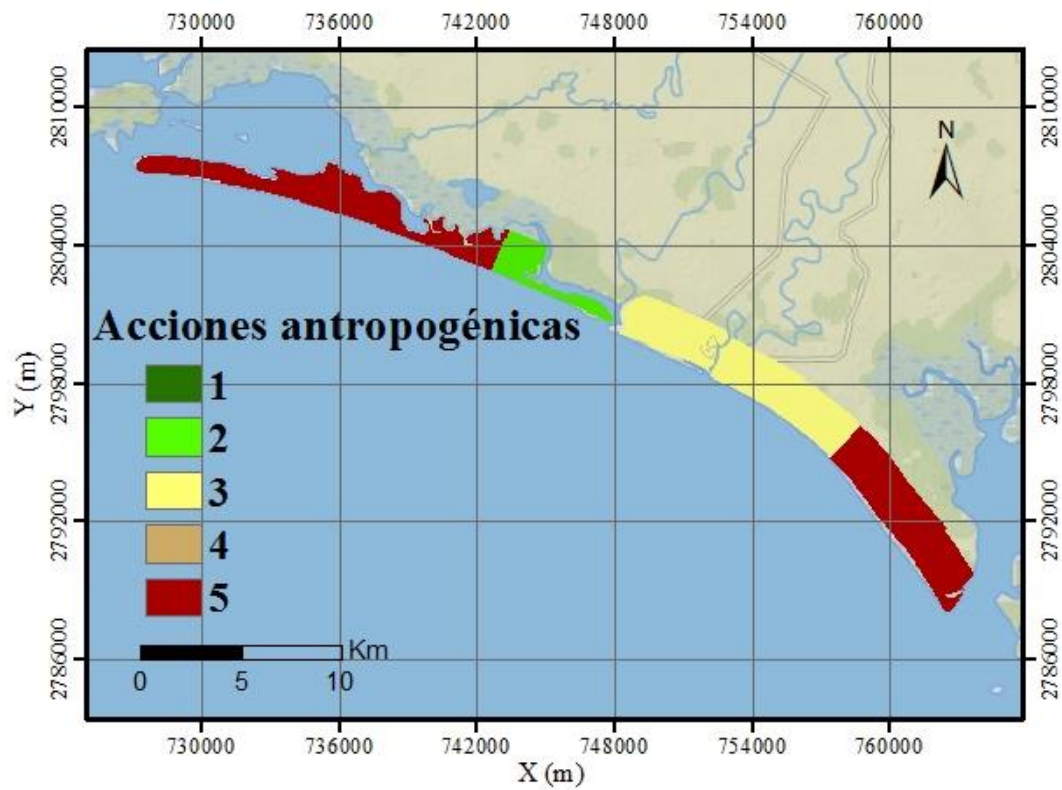


Figura 11. Mapa indicador de Acciones antropogénicas, para el cálculo de vulnerabilidad.

Para el mapa de clasificación de la altura máxima de ola significativa se tomó la altura media de las olas en condiciones de tormenta obteniendo un valor de 3 a 3.5 m el cual se evaluó como valor único para toda la franja costera asignándole así una clase baja a la costa (**Figura 12**). Mientras que para la clasificación del mapa del rango máximo de marea se procesó la información proporcionada por la Secretaria de marina obteniendo el rango de marea máxima promedio de 1.5 m para el área de estudio, la cual se consideró así para toda la costa, asignándole una clase baja (**Figura 13**).

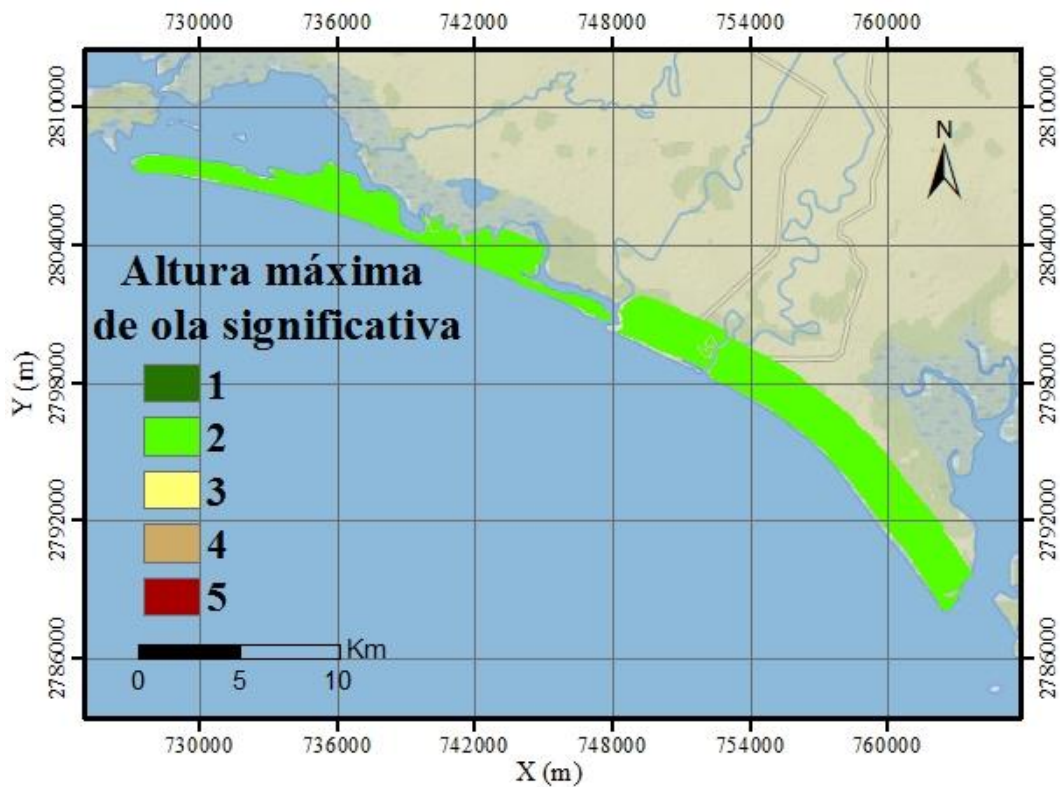


Figura 12. Mapa indicador de Altura máxima de ola significativa, para el cálculo de vulnerabilidad.

Por último, el mapa de clasificación de la tasa de cambio erosión / acreción (**Figura 14**) se generó en base a los resultados obtenidos del análisis de las líneas costeras realizados con el método DSAS.

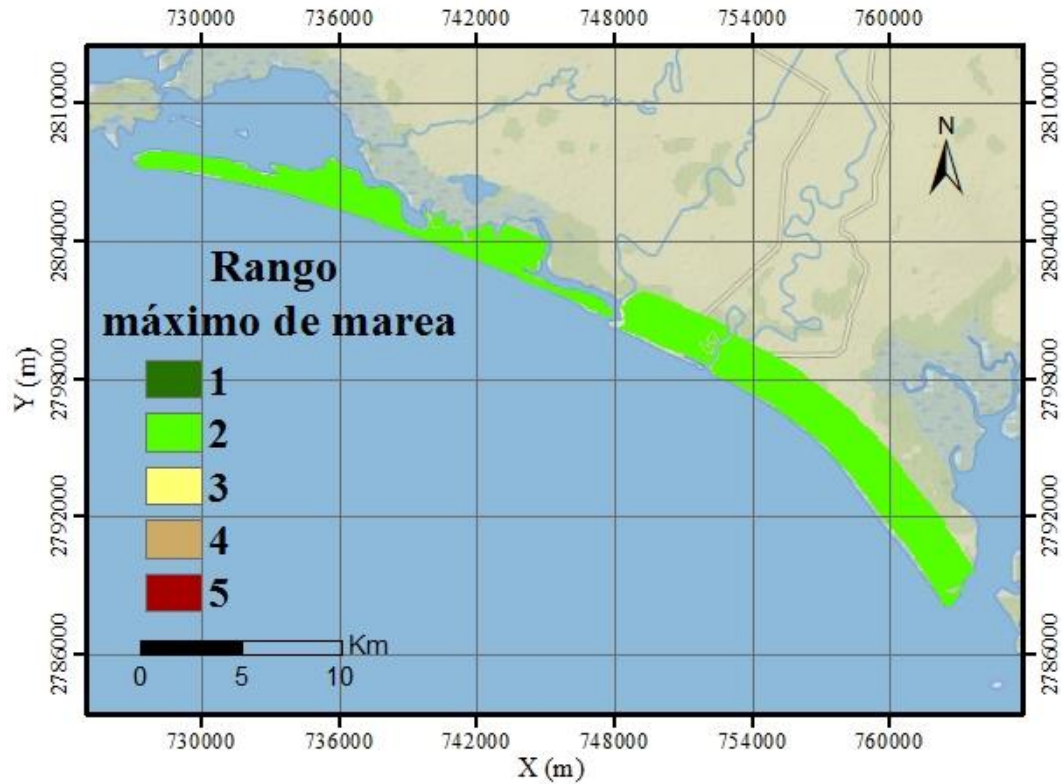


Figura 13. Mapas indicador de Rango máximo de marea, para el cálculo de vulnerabilidad.

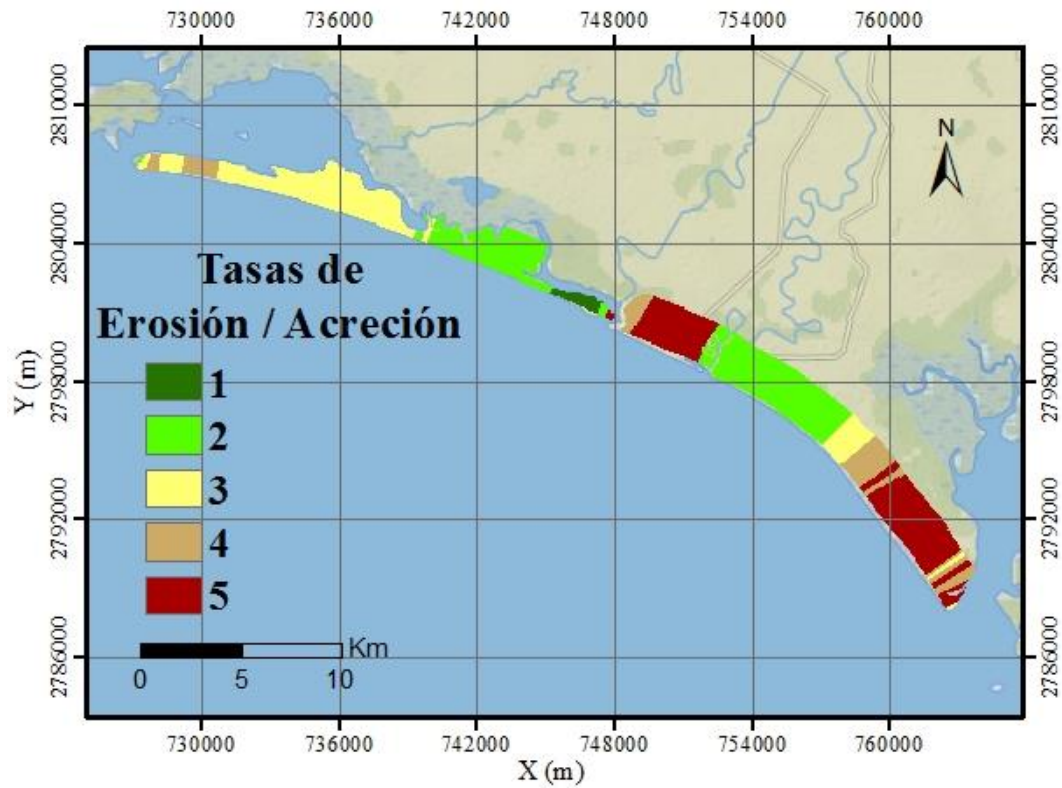


Figura 14. Mapa indicador de Tasas de erosión / acreción, para el cálculo de vulnerabilidad.

Las clasificaciones para los mapas indicadores necesarios para evaluar las consecuencias ante la erosión de la zona de estudio se basaron en las clasificaciones presentadas en la **Tabla 5** del capítulo 2. Para el mapa de densidad de población los datos utilizados corresponden a comunidades cercas de la costa las cuales se encuentran por debajo de los 125 habitantes por km^2 , por lo cual la clasificación para toda la costa fue muy baja (**Figura 15**). Mientras que el área de estudio se clasifico en muy baja y baja para el parámetro de economía (**Figura 16**).

Para realizar la clasificación del parámetro de ecología se consideró (**Figura 17**) una franja que forma parte de sitios RAMSAR: Sistema Lagunar San Ignacio- Navachiste- Macapule en la costa, por tal motivo esta franja se clasifico en muy alta y se dio una clasificación baja a la franja restante debido a la existencia de áreas de interés de la comunidad. El mapa de patrimonio (**Figura 18**) se generó en base a la urbanización de la zona, donde solo se identificaron casas dispersas y carreteras por lo cual donde existían estas se le asigno la clase correspondiente a baja y en las áreas restantes la clase muy baja debido a la nula existencia.

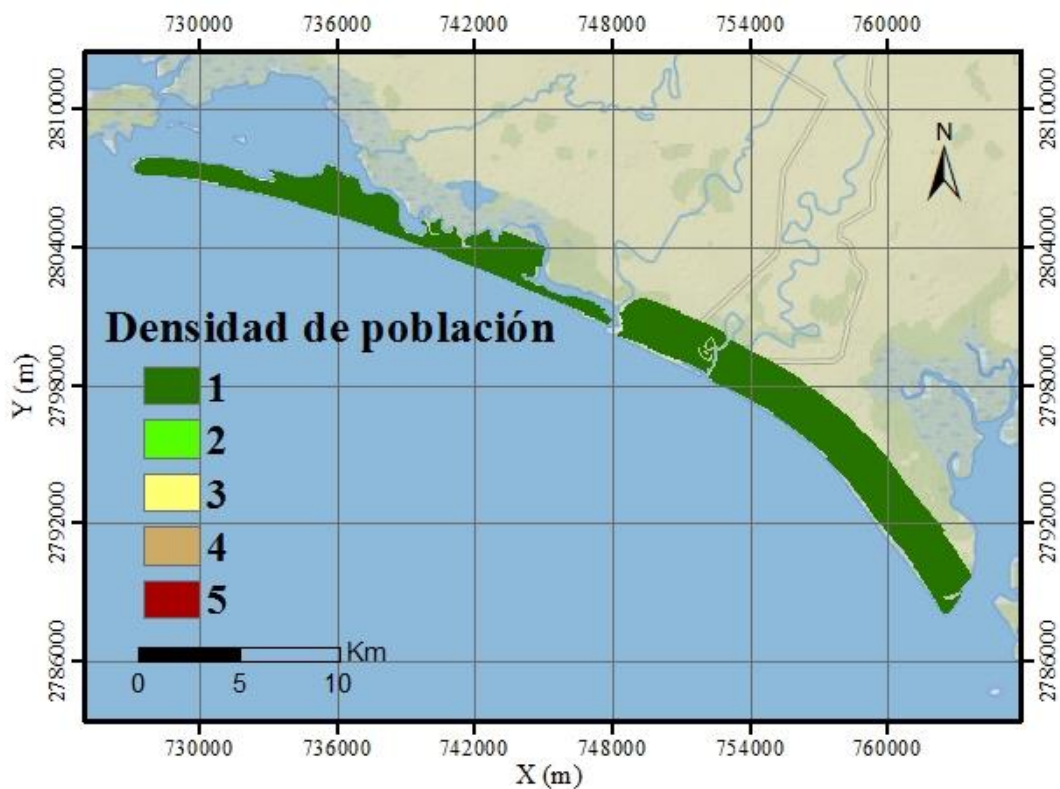


Figura 15. Mapa indicador de Densidad de población, para el cálculo de consecuencia.

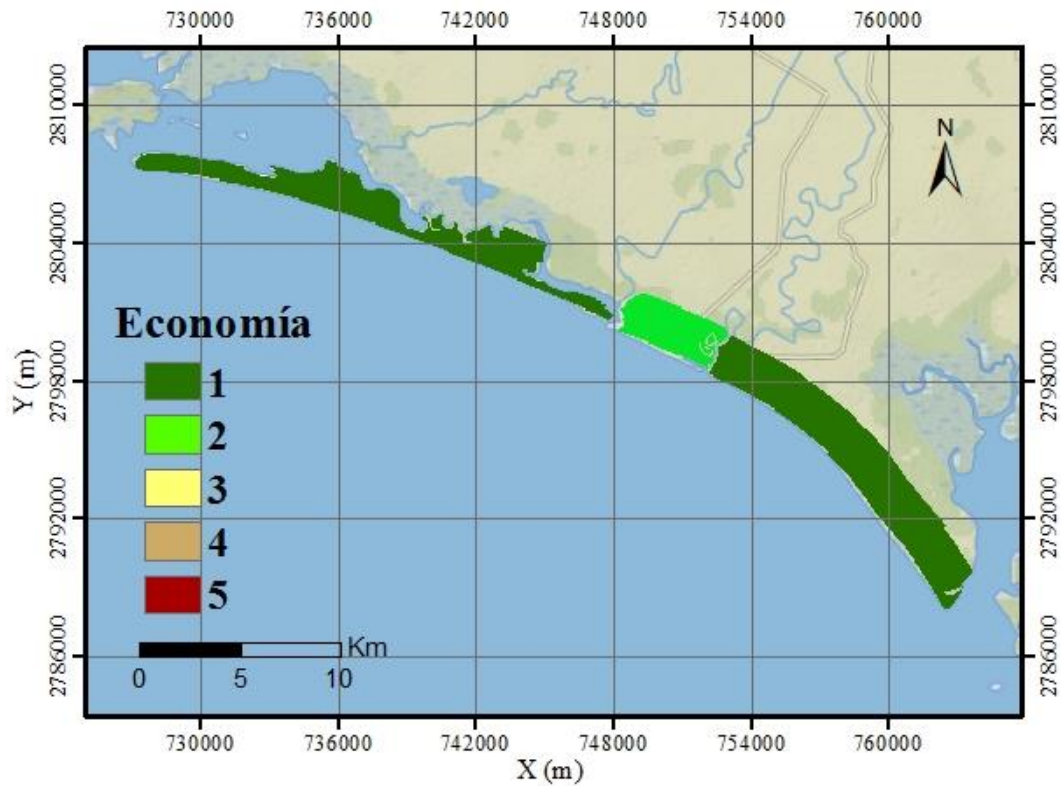


Figura 16. Mapa indicador de Economía, para el cálculo de consecuencia.

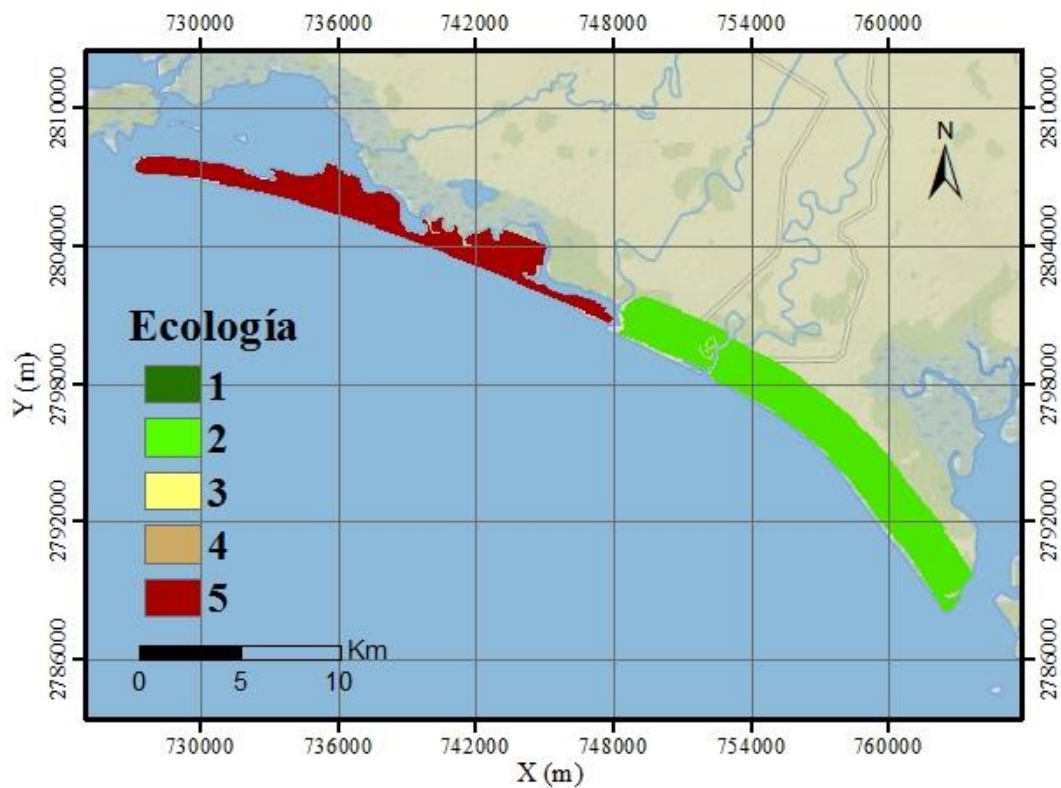


Figura 17. Mapa indicador de Ecología, para el cálculo de consecuencia.

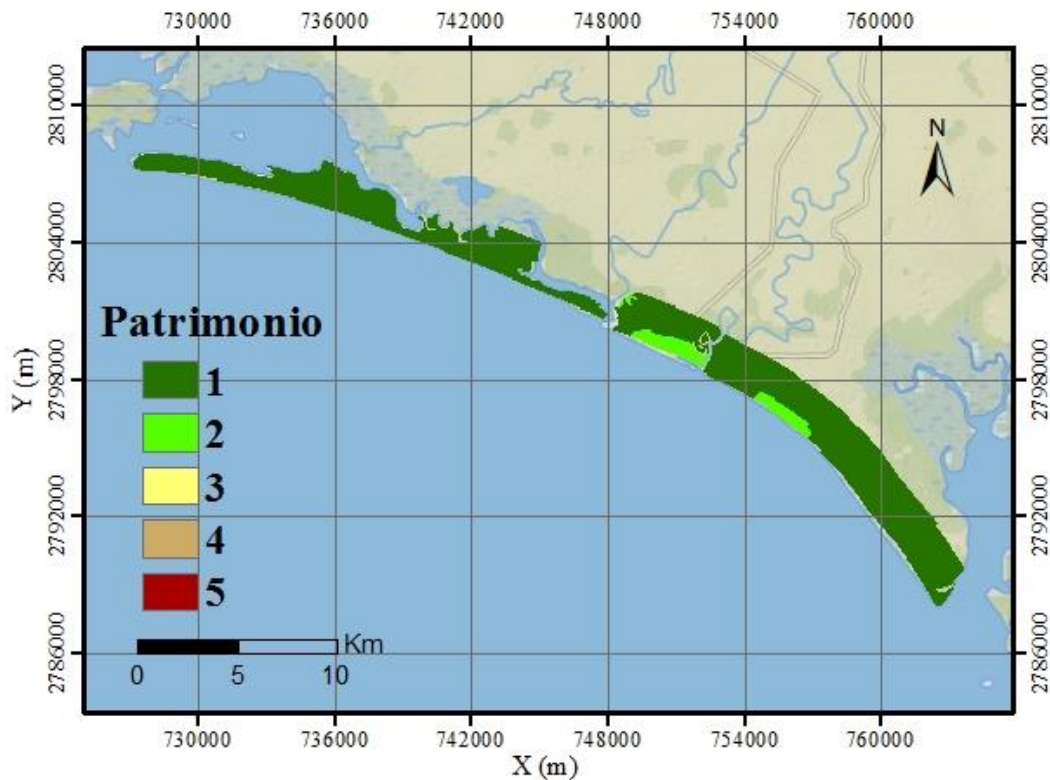


Figura 18. Mapa indicador de Patrimonio, para el cálculo de consecuencia.

El peso que le da CERA a cada parámetro para el cálculo de la vulnerabilidad cambia con el aumento de la distancia y están basados en un análisis de criterios múltiples. Los mapas indicadores que aportaron el mayor peso para evaluar la vulnerabilidad fueron: distancia a la costa, topografía y geología como las más influyentes, pues además de ser los parámetros a los cuales CERA les asigna el mayor peso (más del 50% del peso total dentro de los primeros 500 m de la franja costera) también fueron los que obtuvieron las clasificaciones más altas ya que tienen un impacto directo en la vulnerabilidad de las áreas de estudio. Mientras que los mapas indicadores para el cálculo de las consecuencias tienen el mismo peso.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo, se encontró que la ubicación de los puntos de recesión y acreción en la línea de costa fue variable a lo largo de los períodos de estudio, debido principalmente al efecto de las acciones antropogénicas (**Figuras 19 y 20**). Por otro lado, se generó una base de datos SIG que incluye datos estadísticos, mapas temáticos e índices vinculados de los cuales se obtuvieron resultados que fueron útiles para comprender el riesgo, la vulnerabilidad y las posibles consecuencias presentes en el área de estudio (**Figura 21, 22 y 23**). Además, algunas implicaciones significativas para la protección y el manejo costero en el área de estudio se derivaron del análisis anterior, como la definición de prioridades y el establecimiento de criterios de intervención.

4.1. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA APLICANDO LA HERRAMIENTA DSAS.

4.1.1. ANÁLISIS DECADAL: 1981 – 1993

En el período **1981 - 1993**, la principal acción antropogénica identificada fue el represamiento del río Sinaloa debido a la construcción de las presas Guillermo Blake Aguilar y Gustavo Díaz Ordaz en 1972 y 1981, respectivamente. En este período, toda la playa “Las Glorias” experimentó erosión con una EPR promedio de -5.4 m/año, lo que causó un NSM promedio de -64.9 m. Simultáneamente, las playas “Bellavista” y “Macapule” experimentaron principalmente erosión, con un NSM promedio de -54.1 m y -36.4 m, respectivamente. La EPR promedio de estas playas fue de -4.5 m/año para “Bellavista” y -3.0 m/año para “Macapule” (**Tabla 9 y 10**). Ciertamente, la reducción en la carga de sedimentos que llega a la costa debido al represamiento del río Sinaloa afectó rápidamente la estabilidad de la costa en la zona de estudio, y después de varios años aún se percibe. Este comportamiento es similar al observado por (Ezcurra et al., 2019) en la costa alrededor de los ríos El Fuerte y Santiago ubicados al este del Golfo de California. A medida que estos ríos fueron ser represados, la costa experimentó una rápida recesión en lo que de otro modo debería ser una costa acrecional.

4.1.2. ANÁLISIS DECADAL: 1993 – 2004

Durante el período **1993 - 2004**, la construcción de dos estructuras de rompeolas en la desembocadura del río Sinaloa interrumpió por primera vez la deriva natural del litoral de la zona de estudio. Este hecho exacerbó la erosión de la playa "Las Glorias" con una EPR promedio de -8.6 m/año, lo que condujo a un NSM promedio de -94.9 m durante este período. Mientras que en la playa "Bellavista" promovió la acumulación solo en su margen NW, por lo tanto, el margen SE continuó erosionándose. En general, la playa "Bellavista" experimentó un NSM promedio de -42.8 m con una EPR promedio de -3.9 m/año. En este período, la playa "Macapule", en contraste con el período anterior, experimentó principalmente la acumulación, solo su margen NW continuó erosionándose. Su NSM promedio fue de 11 m con una EPR promedio de 1.0 m/año (**Tabla 9 y 10**). Los resultados obtenidos para la playa de Las Glorias hasta este período son consistentes con lo observado por (Alcántar, 2007), que determinó que entre 1980 y 2004 un NSM promedio de -149 m con una EPR promedio de -6.2 m/año.

4.1.3. ANÁLISIS DECADAL: 2004 – 2016

Para el período **2004 - 2016**, por segunda vez, la deriva natural del litoral en la zona de estudio fue interrumpida por la construcción de otra estructura de rompeolas en la playa "Las Glorias". Esta acción antropogénica promovió la acumulación en el margen NW de esa playa, pero el margen SE continuó erosionándose. Mientras que en la playa "Bellavista" no tuvo efecto y en la playa "Macapule" generó la erosión en su margen SE. Durante este período, las playas "Las Glorias", "Bellavista" y "Macapule" experimentaron promedios NSM de -62.5 m, -29.2 m y -16.0 m a promedios EPR de -5.4 m/año, -2.4 m/año y -1.3 m/año, respectivamente (**Tabla 9 y 10**).

Es importante notar que la erosión en el margen SE de la playa "Macapule" modificó la boca del estuario de "La Piedra". Además, es posible que la boca continúe aumentando y generando más erosión en la playa "Macapule".

Una situación similar a la descrita anteriormente, ha sido observada por (Martínez et al., 2019) en la playa "Chachalacas" (región central del Golfo de México), donde la construcción de espigones y la rápida urbanización están afectando la estabilidad de la playa y desembocadura del río Actopan. La costa ha cambiado rápidamente y no parece haberse estabilizado, lo que evidencia la necesidad de monitorearla, para evitar cambios potencialmente drásticos en "Chachalacas".

De manera similar en la zona de estudio, la desembocadura el estuario de "La Piedra" necesita ser monitoreado regularmente, ya que los resultados obtenidos indican que la construcción de la estructura del rompeolas en el margen NW de la playa "Las Glorias" ha tenido un efecto considerable en la evolución del margen SE de la playa "Macapule".

4.1.4. ANÁLISIS A CORTO PLAZO: 2016 – 2018

Con respecto al periodo **2016 - 2018**, las playas "Las Glorias", "Bellavista" y "Macapule" experimentaron promedios de NSM de -3.9 m, -3.1 m y -7.1 m a promedios EPR de -1.9 m/año, -1.5 m/año y -3.5 m/año, respectivamente (**Tablas 9 y 10**). Los valores promedio de las EPR fueron menos significativas que en los periodos anteriores. Esto podría deberse a que no hay acciones antropogénicas significativas recientes en el área de estudio. Sin embargo, hay otras acciones a considerar en este análisis, por ejemplo, la acción de las tormentas y el aumento del nivel del mar.

Para este periodo no hay registro de ciclones que pudieran haber causado un daño severo al área de estudio, pero si ha habido incremento del nivel medio local del mar a una tasa del orden de 2.95 mm/año de acuerdo con las tendencias del nivel del mar en México del Servicio Mareografico Nacional (SMN) (Vázquez-Bolleteo, 2008). El valor de esta tasa es muy similar a la reportada por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático para el océano mundial en su más reciente informe (Church et al., 2013).

La contribución del incremento del nivel del mar (SLR) a la erosión costera en la zona de estudio en los periodos anteriores es difícil de determinar. Si bien, en este periodo al no haber acciones antropogénicas significativas ni incidencia de ciclones severos, es probable que la

recesión se debió principalmente al SLR. Por lo tanto, el SLR es una acción que debe considerarse en la protección costera y gestión de la zona de estudio, ya que hubo algunos indicios de que contribuyó a la erosión costera.

4.1.5. ANÁLISIS A LARGO PLAZO: 1981 – 2018

Finalmente, en el período a largo plazo de **1981 - 2018**, los resultados indican que la costa de la zona de estudio se ha erosionado con una EPR promedio de -2.8 m/año, lo que llevó a un NSM promedio de -100 m (**Tabla 9 y 10**). La playa más erosiva es “Las Glorias” con un NSM promedio de -227 m con una EPR promedio de -6.2 m/año y la menos erosiva es “Macapule” con un NSM promedio de -55 m con una EPR promedio de -1.5 m/año. Cabe señalar que la playa “Bellavista” experimentó una fuerte erosión en una franja de aproximadamente 6 km al SE de la playa, similar a la de la playa “Las Glorias”.

La explicación más plausible de la diferencia en el NSM y EPR a lo largo de la costa se encuentra en el tipo de evolución de la costa que ocurrió durante las diferentes intervenciones antropogénicas como el represamiento del río Sinaloa y la construcción de espigones en la playa.

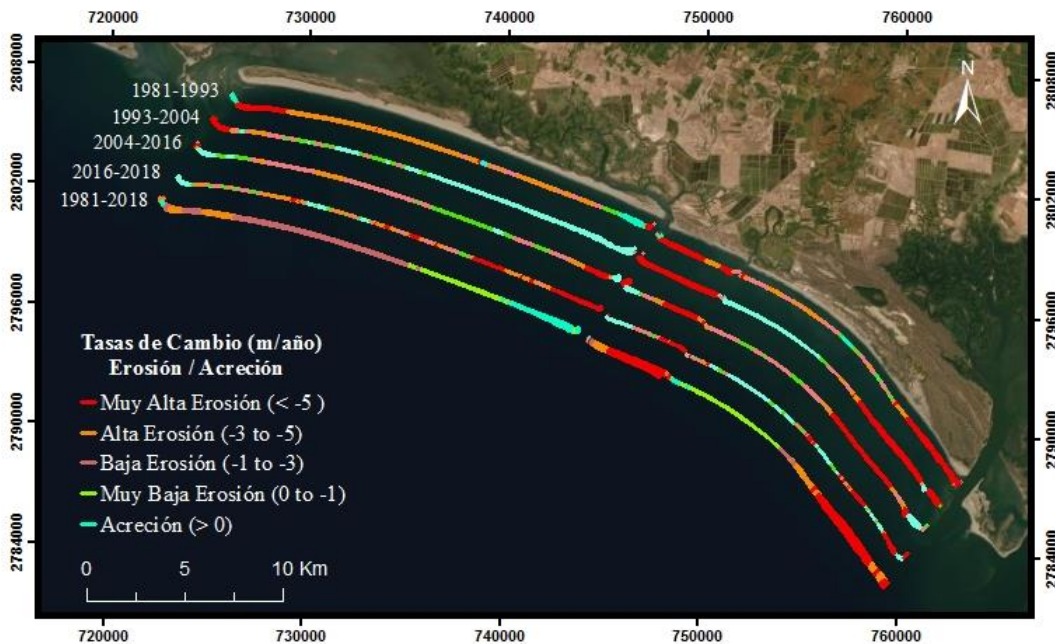


Figura 19. Tasas de Cambio o tasa de punto final (EPR).

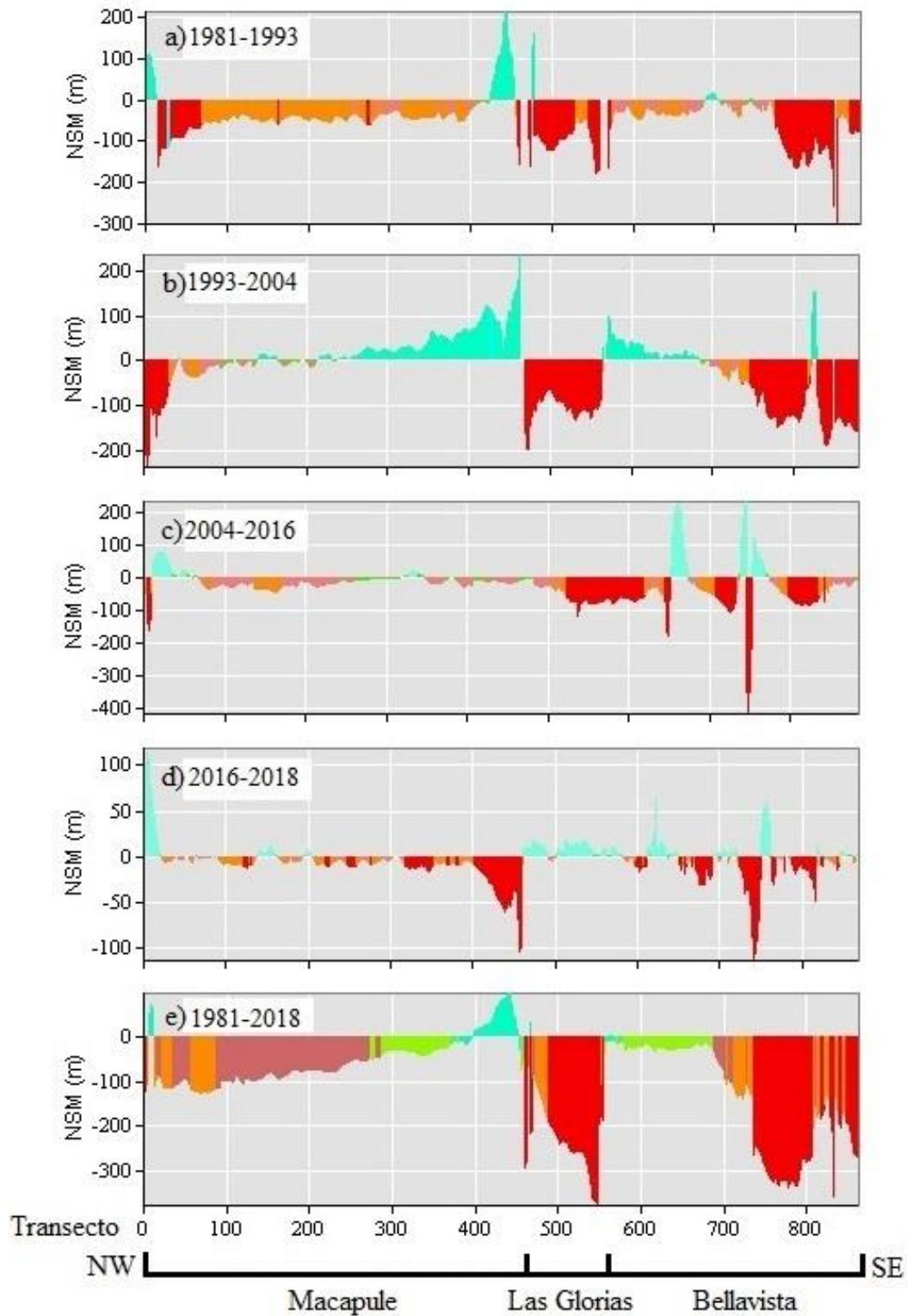


Figura 20. Histograma representativo del desplazamiento neto de la línea costera para cada uno de los periodos de analizados.

Tabla 9. Tasas de cambio promedio de la línea de costa para cada uno de los periodos y sectores analizados.

Periodo	EPR (m/año)			
	Playa	Playa	Playa	General
	Macapule	Las Glorias	Bellavista	
1981-1993	-3.0	-5.4	-4.5	-3.9
1993-2004	1.00	-8.6	-3.9	-1.9
2004-2016	-1.3	-5.4	-2.4	-2.1
2016-2018	-3.5	-1.9	-1.5	-2.6
1981-2018	-1.5	-6.2	-3.5	-2.8

Tabla 10. Movimiento neto promedio de la línea de costa para cada uno de los periodos y sectores analizados.

Periodo	NSM (m)			
	Playa	Playa	Playa	General
	Macapule	Las Glorias	Bellavista	
1981-1993	-36.3	-64.9	-54.1	-47.4
1993-2004	11.0	-94.9	-42.8	-20.9
2004-2016	-16.0	-65.2	-29.2	-25.2
2016-2018	-7.1	-3.9	3.1	5.4
1981-2018	-55.0	-227.0	-131.2	-100.0

Los resultados muestran que la costa en estudio ha sido alterada drásticamente desde los años 80, tanto por acciones antrópicas como por procesos naturales afectando principalmente a playa Las Glorias. Las presas y las escolleras y el rápido crecimiento de la población han afectado en gran medida la dinámica de la playa, la cual inicialmente fue alterada con la construcción de las presas provocando reducción del aporte de sedimentos hacia la playa; además la construcción de infraestructura inadecuada para protección de la costa como las escolleras que alteraron significativamente la dinámica de la costa.

4.2. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN COSTERA: CERA

La evaluación del riesgo de la erosión costera con CERA permitió clasificar la vulnerabilidad de muy alta (clase V) a moderada (clase III). La parte más vulnerable de la zona de estudio se presentó en una tira alrededor de 200 m frente a la costa cubriendo el 11% del área total a lo largo de la costa en estudio. Estos resultados se pueden comparar con lo obtenido por (Narra et al., 2019) en Quintana Roo, donde se observa que Quintana Roo es menos vulnerable ante la erosión (Clase IV) que la costa en estudio de esta investigación. (Narra et al., 2017) obtuvo una vulnerabilidad alta (clase IV) para la costa de Aveiro, lo cual indica que la costa en estudio de este trabajo sigue siendo la más vulnerable.

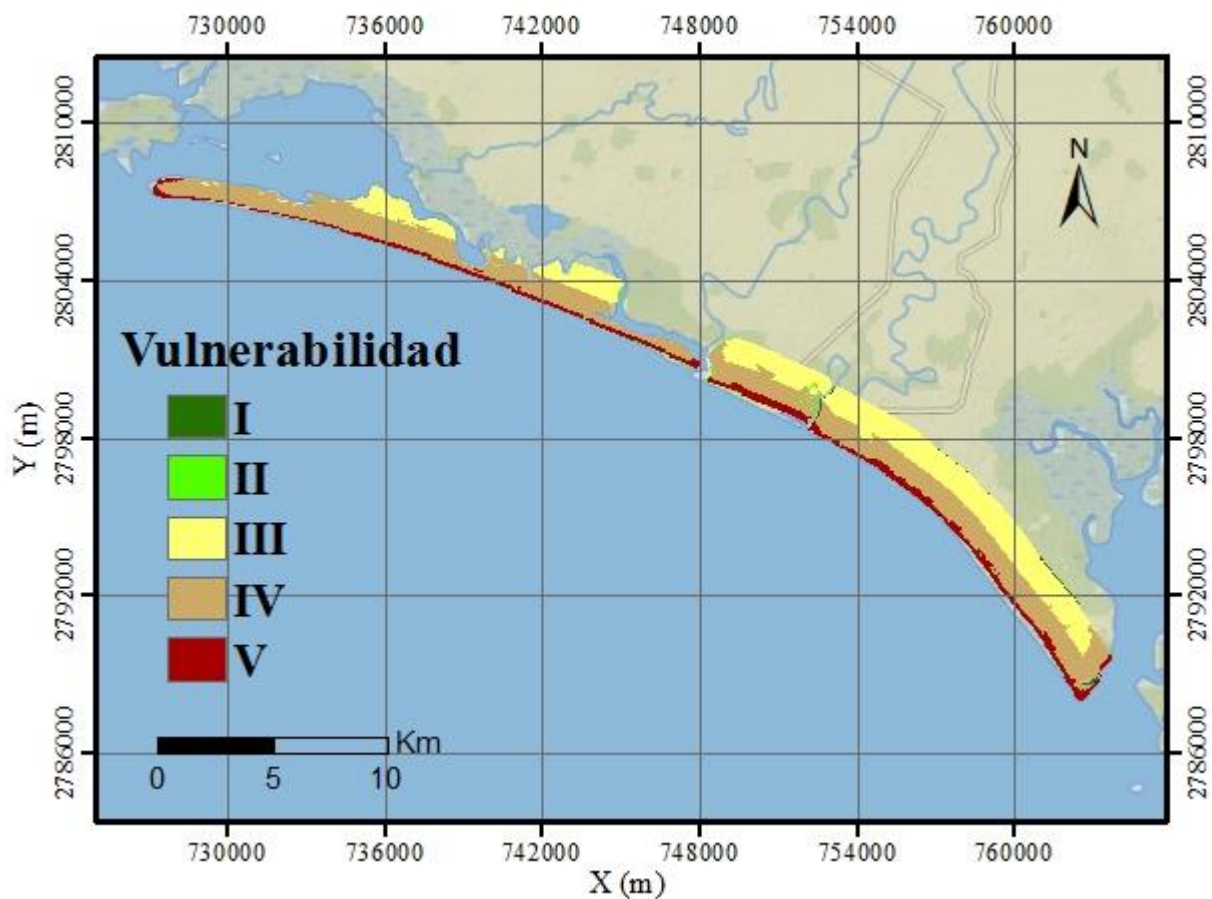


Figura 21. Mapa de resultados sobre la Vulnerabilidad para el área de estudio.

Las consecuencias potenciales se clasificaron prácticamente a todo lo ancho como baja (clase II) sobre “Las Glorias” y “playas Macapule” similar a lo obtenido en Macaneta por (Narra et al., 2017) y como muy bajo (clase I) en la playa “Bellavista”.

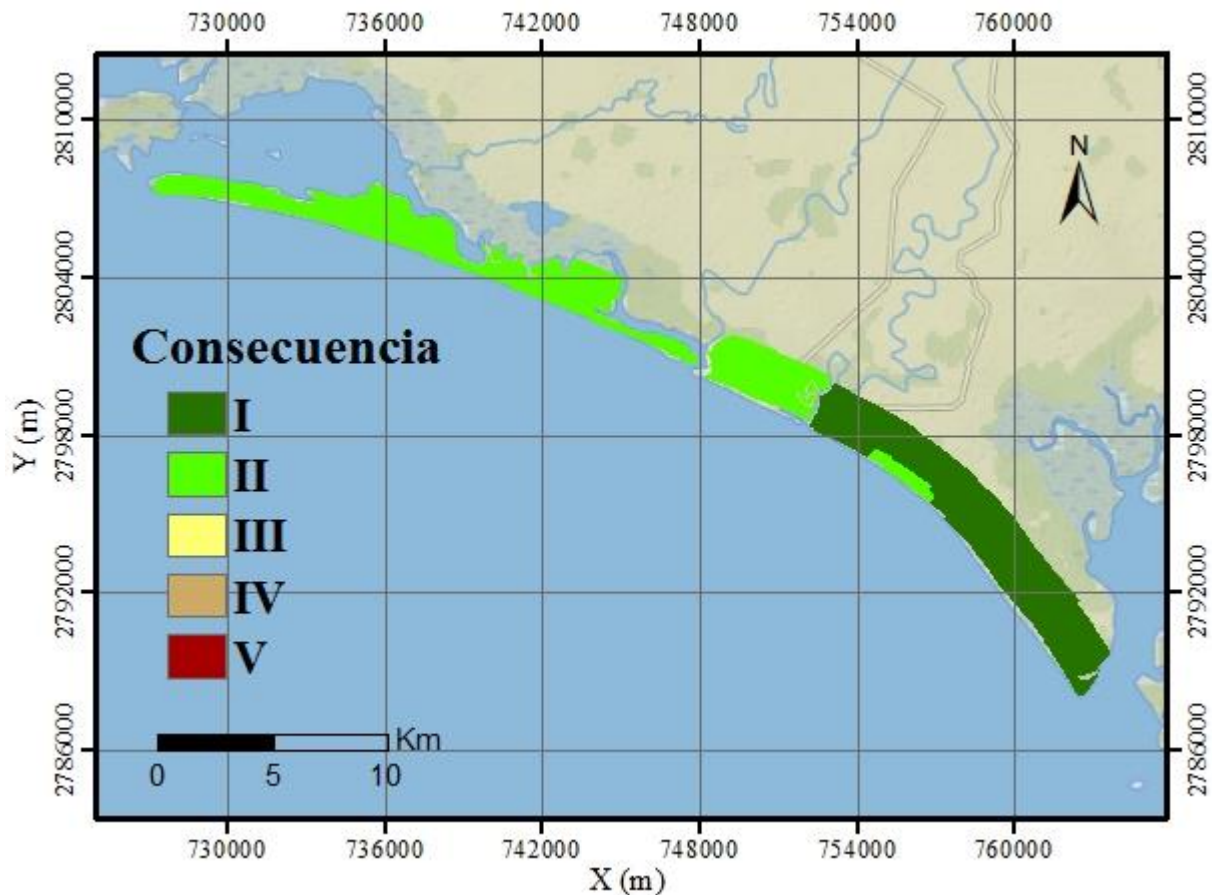


Figura 22. Mapa de resultados de Consecuencia para el área de estudio.

Como resultado final se obtuvo el mapa de riesgo que varía espacialmente de manera similar a la vulnerabilidad, pero muestra gravedad más baja en la clasificación, es decir, que varió de alta (clase IV) cubriendo el 30% del área total, a baja (clase II) debido a la baja severidad en la clasificación de las potenciales consecuencias que podría afectar a la zona de estudio. Esto resultó similar a lo obtenido por Narra et al., (2017), para la costa de Aveiro donde predominaron las clases moderada (II) y alta (IV). Aunque existen estas similitudes también surge una gran diferencia ya que al norte de Aveiro se presentó una clase muy alta (V) en algunas partes de la costa, mientras que para este estudio la clase muy alta (V) no se presentó debido a las bajas consecuencias obtenidas.

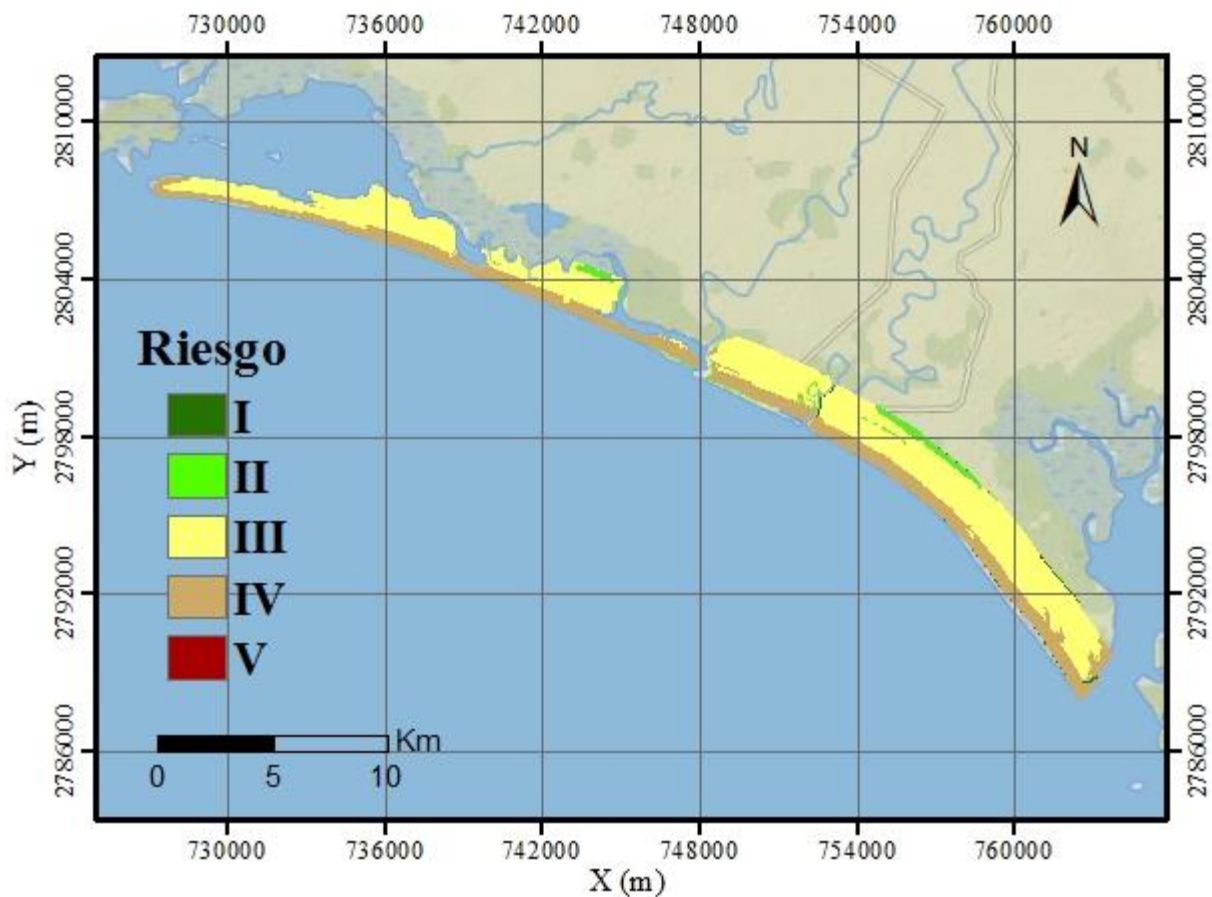


Figura 23. Mapa de resultados sobre el Riesgo Costero para el área de estudio

Estos resultados proporcionan una visión general de la variabilidad actual con respecto a la vulnerabilidad, las consecuencias y el riesgo en el área de estudio. Se aprecia que la vulnerabilidad es mayor que las posibles consecuencias, por lo tanto, reducir la vulnerabilidad es más apropiado para reducir el riesgo.

Desde el enfoque CERA, la cuantificación de la vulnerabilidad depende principalmente de las características físicas de la costa, por lo tanto, las medidas de mitigación basadas físicamente podrían tener un mayor impacto en la reducción de la vulnerabilidad según (Boruff et al., 2005). Estas medidas pueden ser estructurales o no estructurales (Merlotto et al., 2016).

El área de estudio se caracteriza principalmente por una baja topografía, playas arenosas con bocas, donde se observan tasas de erosión significativas y está sujeto a una alta presión antropogénica debido a la construcción de obras de ingeniería tanto en la playa como en el río Sinaloa. En este caso, se puede definir como una medida de mitigación la reubicación de construcciones existentes en áreas de alta vulnerabilidad, la adopción de medidas como la alimentación de playas y la defensa costera en los puntos locales altos de erosión.

También es necesaria una revaluación periódica del mapa de vulnerabilidad en relación con algunos parámetros, ya que dependen de la evolución de la costa, de los cambios en el uso de la tierra y de las actividades humanas en la zona costera, y porque esto puede tener consecuencias en la clasificación de vulnerabilidad global.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

En esta investigación se examinaron los cambios históricos de la costa en las escalas de tiempo decenal y de corto plazo de una franja costera al norte del estado de Sinaloa, dentro de la región del Golfo de California. También se determinaron para la misma franja costera la gravedad actual del riesgo de erosión, la vulnerabilidad y las posibles consecuencias que podrían afectarlo.

Para dicha franja costera considerada como área de estudio, los resultados y la discusión del análisis de la costa indican que la represa del río Sinaloa ha sido la acción antropogénica que ha causado en general la mayor recesión en la costa. La construcción de dos espigones en la desembocadura del mismo río es la segunda acción antropogénica más importante en términos de la recesión costera, que magnificó la recesión de la costa de la playa "Las Glorias". Posteriormente, la construcción del rompeolas en el margen NW de la playa "Las Glorias" es la acción antropogénica significativa más reciente, que atenuó la recesión de la costa de la playa "Las Glorias" pero causó la recesión de la costa de la playa "Macapule".

Debe agregarse que el efecto de estas acciones antropogénicas sigue siendo significativo ya que interrumpen el suministro y el transporte de sedimentos. Con respecto a la evaluación del riesgo costero, el área de estudio es de hecho vulnerable al riesgo de erosión costera y, sin embargo, no tiene un riesgo mayor solo por el bajo valor de las infraestructuras actuales.

Siendo realistas, no será posible restablecer los suministros de sedimentos naturales a la costa que fueron reducidos o eliminados por los efectos antropogénicos de las presas y los espigones. Si bien es útil buscar soluciones e implementar medidas correctivas cuando sea posible; algunas de estas acciones antropogénicas comenzaron hace casi medio siglo, serían muy caras y se consideran poco prácticas de remediar. Como se sugirió ampliamente, es crucial que se establezcan líneas de retroceso en el área de estudio y en otras áreas costeras consideradas como centros potenciales para desarrollar la región del Golfo de California.

Dichas líneas de retroceso deben reevaluarse constantemente teniendo en cuenta las nuevas acciones antropogénicas, la urbanización y la variabilidad del nivel medio del mar, las condiciones de las olas y las mareas de tormenta.

Sin embargo, también se recomienda la adopción de medidas como la alimentación de las playas y la defensa costera en los puntos donde se presente la mayor erosión. Una comprensión profunda de la morfodinámica del sistema es un requisito previo. No obstante, los resultados presentados en este estudio pueden proporcionar una base para que los tomadores de decisiones eviten los futuros asentamientos humanos en áreas de alto riesgo, evitando así los gastos relacionados con las estructuras y la destrucción y reconstrucción de viviendas.

La cuantificación de la influencia ejercida por la urbanización y el aumento del nivel del mar en la dinámica de la costa del área de estudio está fuera del alcance de este documento; sin embargo, futuras investigaciones se pueden alentar en esa dirección, ya que hubo algunos indicios de que es probable que estén contribuyendo a la recesión de la costa.

BIBLIOGRAFÍA:

- Ahmad, S. R., y Lakhan, V. C. (2012). GIS-Based Analysis and Modeling of Coastline Advance and Retreat Along the Coast of Guyana. *Mar. Geod.* 35, 1–15. doi:10.1080/01490419.2011.637851.
- Albuquerque, M., Espinoza, J., Teixeira, P., de Oliveira, A., Corrêa, I., y Calliari, L. (2013). Erosion or Coastal Variability: An Evaluation of the DSAS and the Change Polygon Methods for the Determination of Erosive Processes on Sandy Beaches. *J. Coast. Res.* 65, 1710–1714. doi:10.2112/si65-289.1.
- Alcántar, R. E. (2007). Variabilidad espacio temporal del perfil de playa, en playa Las Glorias, Guasave, Sinaloa.
- Appelquist, R. L., y Halsnæs, K. (2015). The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate. *J. Coast. Conserv.* 19, 157–179. doi:10.1007/s11852-015-0379-7.
- ArcGIS Resource Center Introducción a SIG. Available at: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>.
- Bolleteo, A. V., Villanueva-Fragoso, S., y Galaviz, J. . (2011). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición)*. Segunda. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Boruff, B. J., Emrich, C., y Cutter, S. L. (2005). Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. *J. Coast. Res.* 215, 932–942. doi:10.2112/04-0172.1.
- Carranza-Edwards, A. (2010). Causas y consecuencias de la erosión de playas. *Impactos del Cambio Climático sobre la Zo. Costera*, 37–50.
- CENAPRED-SEGOB (2014). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*.
- CENAPRED (2014). *Conceptos Básicos para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*.
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., et al. (2013). “Sea level change”, en *Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report*

- of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Bosch, 895–900. doi:10.1007/978-1-4020-4399-4_309.
- Chuvieco, E. S. (2008). *Teledetección Ambiental*. Tercera ed.
- Cifuentes, M. A., y Rosero, Leydy Viviana; Selvaraj, J. J. (2017). DETECCIÓN DE CAMBIOS DE LA LÍNEA COSTERA AL NORTE DEL DISTRITO DE BUENAVENTURA MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS. *Boletín Investig. Mar. y Costera* 46, 137–152. Available at: <http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v46n1/0122-9761-mar-46-01-00137.pdf>
- Coelho, C. D. B. (2005). Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Available at: <http://hdl.handle.net/10773/2405>.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., y Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Soc. Sci. Q.* 84, 242–261. doi:10.1111/1540-6237.8402002.
- De Figueiredo, S. A., Calliari, L. J., y Machado, A. A. (2018). Modelling the effects of sea-level rise and sediment budget in coastal retreat at hermenegildo beach, Southern Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 66, 210–219. doi:10.1590/s1679-87592018009806602.
- Díaz, E. A. Aragón, J. A. Arreola, L. Brioto, M. S. Burrola, S. Carreón, A. Cruz, P. González, M. M. Manzano, G. P. y D. U. (2011). “Vulnerabilidad de las zonas costeras por elevación del nivel del mar en el Golfo de California. p. 471-484.”, en *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición)*, ed. y J. L. R. G. Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez (Campeche: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universis Autónoma de Campeche.), 754.
- Enríquez-Andrade, R., Anaya-Reyna, G., Barrera-Guevara, J. C., De Los Ángeles Carvajal-Moreno, M., Martínez-Delgado, M. E., Vaca-Rodríguez, J., et al. (2005). An analysis of critical areas for biodiversity conservation in the Gulf of California Region. *Ocean Coast. Manag.* 48, 31–50. doi:10.1016/j.ocecoaman.2004.11.002.
- Erosión - CORIMAT Available at: <https://corimat.net/es/erosion/>
- Escudero Castillo, M., Mendoza Baldwin, E., Silva Casarin, R., Posada Vanegas, G., y Arganis Juaréz, M. (2012). Characterization of Risks in Coastal Zones: A Review. *Clean - Soil, Air, Water* 40, 894–905. doi:10.1002/clen.201100679.

- Ezcurra, E., Barrios, E., Ezcurra, P., Ezcurra, A., Vanderplank, S., Vidal, O., et al. (2019). A natural experiment reveals the impact of hydroelectric dams on the estuaries of tropical rivers. *Sci. Adv.* 5. doi:10.1126/sciadv.aau9875.
- Franco-Ochoa, C., García-Páez, F., Plata-Rocha, W., Montoya-Rodríguez, M., y Vergara-Sánchez, M. (2019). Observation and analysis of hydro-morphologic parameters in Las Glorias beach, México. *Tecnol. y Ciencias del Agua* 10, 153–170. doi:10.24850/j-tyca-2019-02-06.
- Franco, R. (2017). Composiciones Landsat en ARCGIS. Bogotá, Colombia doi:4898.
- Hinkel, J., y Klein, R. J. T. (2009). Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Glob. Environ. Chang.* 19, 384–395. doi:10.1016/j.gloenvcha.2009.03.002.
- Hoyos, N., Acosta, S., y Correa, I. (2006). Sistema de información geográfica para el estudio de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba Colombia: Herramienta de diseño, implementación y uso. *Gestión y Ambient.* vol.9, 174–156. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169421027001>.
- INEGI, I. N. de E. y G. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Sinaloa 2017*.
- IPCC CZMS (1992). ‘A common methodology for assessing vulnerability to sea level rise’, 2nd revision, in IPCC CZMS, Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea, Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Response Strategies Working Group of the Intergove.
- Jiménez-Illescas, Á. R., Zayas-Esquer, M. M., y Espinosa-Carreón, T. L. (2019). Integral Management of the Coastal Zone to Solve the Problems of Erosion in Las Glorias Beach, Guasave, Sinaloa, Mexico. *Coast. Manag.*, 141–163. doi:10.1016/b978-0-12-810473-6.00010-8.
- Jonah, F. E., Boateng, I., Osman, A., Shimba, M. J., Mensah, E. A., Adu-Boahen, K., et al. (2016). Shoreline change analysis using end point rate and net shoreline movement statistics: An application to Elmina, Cape Coast and Moree section of Ghana’s coast. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 7, 19–31. doi:10.1016/j.rsma.2016.05.003.
- Jurado, P., y Fernández-Díaz, M. (2018). Escala, Esfuerzo Digitalizador Y Fractalidad En La Línea De Costa. *GeoFocus Rev. Int. Cienc. y Tecnol. la Inf. Geográfica* 21, 253–277. doi:10.21138/gf.568.

- Kallepalli, A., Kakani, N. R., y James, D. B. (2017). Digital shoreline analysis system-based change detection along the highly eroding Krishna–Godavari delta front. *J. Appl. Remote Sens.* 11, 1. doi:10.1117/1.jrs.11.036018.
- Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A., y Morales De la Garza, E. (2007). Caracterización textural de la arena de playa del Golfo de California, México: Implicaciones para los procesos costeros y el relieve. *Ciencias Mar.* 33, 83–94. doi:10.7773/cm.v33i1.1018.
- Khorram, S., van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A. C., y Potts, M. D. (2016). Principles of applied remote sensing. *Princ. Appl. Remote Sens.*, 1–20. doi:10.1007/978-3-319-22560-9_1.
- Kokot, R. R. (2004). Erosión en la costa patagónica por cambio climático. *Rev. la Asoc. Geológica Argentina* 59, 715–726. Available at: <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v59n4/v59n4a18.pdf>
- Kokot, R. R., y Chomnalez, F. (2012). Retroceso de la línea de costa en Las Grutas, provincia de Río Negro. *Rev. la Asoc. Geol. Argentina* 69, 88–96.
- Larson, M., y Wise, R. A. (1998). Simple models for equilibrium profiles under breaking and non-breaking waves. *Proc. Coast. Eng. Conf.* 3, 2722–2735. doi:10.1061/9780784404119.206.
- Lee, Y., Eom, J., Do, J., Kim, B., y Ryu, J. (2019). Shoreline Movement Monitoring and Geomorphologic Changes of Beaches Using Lidar and UAVs Images on the Coast of the East Sea, Korea. *J. Coast. Res.* 90, 409. doi:10.2112/si90-052.1.
- Lemée, C., Guillard, M., Fleury-Bahi, G., Krien, N., Chadenas, C., Chauveau, E., et al. (2019). What meaning do individuals give to coastal risks? Contribution of the social representation theory. *Mar. Policy* 108, 103629. doi:10.1016/j.marpol.2019.103629.
- Lins-de-barros, F. M., y Muehe, D. (2010). Avaliação local da vulnerabilidade e riscos de inundação na zona costeira da Região dos Lagos , Rio de Janeiro Local vulnerability to inundation assessment at the coastal zone of Lake Region , Rio de Janeiro. *Environ. Geosci.* 02, 55–66.
- Lins-de-Barros, F. M., y Muehe, D. (2013). The smartline approach to coastal vulnerability and social risk assessment applied to a segment of the east coast of Rio de Janeiro State, Brazil. *J. Coast. Conserv.* 17, 211–223. doi:10.1007/s11852-011-0175-y.

- Lizano R, O. G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *Rev. las Sedes Reg. la Univ. Costa Rica* XIV, 6–27. Available at: <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/17803/17354>.
- Martínez, M. L., Landgrave, R., Silva, R., y Hesp, P. (2019). Shoreline Dynamics and Coastal Dune Stabilization in Response to Changes in Infrastructure and Climate. *J. Coast. Res.* 92, 6. doi:10.2112/si92-002.1.
- Merlotto, A., Bértola, G. R., y Piccolo, M. C. (2016). Hazard, vulnerability and coastal erosion risk assessment in Necochea Municipality, Buenos Aires Province, Argentina. *J. Coast. Conserv.* 20, 351–362. doi:10.1007/s11852-016-0447-7.
- Montoya-Rodríguez, J. M. (2016). Red Nacional de Datos Oceanográficos para Zonas Costeras. *Rev. IC Ing. Civ.*, 566, 14–18. Available at: https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/ic-566_ok/16.
- Narra, P., Coelho, C., Sancho, F., Escudero, M., y Silva, R. (2019). Coastal Hazard Assessments for Sandy Coasts: Appraisal of Five Methodologies. *J. Coast. Res.* 35, 574. doi:10.2112/jcoastres-d-18-00083.1.
- Narra, P., Coelho, C., Sancho, F., y Palalane, J. (2017). CERA: An open-source tool for coastal erosion risk assessment. *Ocean Coast. Manag.* 142, 1–14. doi:10.1016/j.ocecoaman.2017.03.013.
- noooo (2016). borrar. Available at: <http://www.coastalhazardwheel.org/media/1218/catalogue-coastal-hazard-wheel.pdf>.
- Ojeda, J., Álvarez, J., Cajaraville, D., y Fraile, P. (2009). El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN 1578-5157 9, 83–101. Available at: http://geofocus.rediris.es/2009/Articulo4_2009.pdf.
- Ojeda Zújar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín la Asoc. Geógrafos Españoles*, 103–118.
- Pachauri, R. K., Reisinger, A., Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., et al. Cambio climático 2007 Equipo de redacción principal Equipo de redacción principal OMM PNUMA.
- Pat Doody, Maria Ferreira, Stéphane Lombardo, Irene Lucius, Robbert Misdorp, H., Niesing, Albert Salman, Marleen Smallegange, Jordi Serra Raventós, E. R., y Pedro Fernández

- Bautista, C. P. (2005). VIVIR CON LA EROSIÓN COSTERA EN EUROPA. Sedimentos y Espacio Para La Sostenibilidad Resultados Del Estudio Eurosion. Available at: <http://europa.eu.int>.
- Pires, I., Craveiro, J., y Antunes, Ó. (2012). Artificialização do solo e Vulnerabilidade Humana em duas zonas sujeitas a processos de erosão costeira: casos de estudo da Costa da Caparica e Espinho (Portugal). *Rev. Gestão Costeira Integr.* 12, 277–290. doi:10.5894/rgci316.
- Prieto, A., Ojeda, J., Rodríguez, S., Gracia, F. J., y Río, L. Del (2012). Procesos erosivos (tasas de erosión) en los deltas mediterráneos andaluces: herramientas de análisis espacial (DSAS) y evolución temporal (servicios OGC). en *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC*, 19–21.
- Rondón Ramírez, G. (2018). Adaptación de un índice de vulnerabilidad costera - IVC para el litoral peruano: un estudio de caso. *Espac. y Desarro.* 57, 33–57. doi:10.18800/espacioydesarrollo.201801.002.
- Rosendahl Appelquist, L., Balstrøm, T., Halsnæs, K., Nicholls, R. J., Linham, M. M., Spensley, J., et al. (2016). Managing climate change hazards in Coastal areas: The Coastal Hazard Wheel decision-support system. Available at: <http://www.coastalhazardwheel.org/media/1218/catalogue-coastal-hazard-wheel.pdf>.
- Rueda de peligro costero Available at: <https://coastalhazardwheel.org/>
- Sarewitz, D., Pielke, R., y Keykhah, M. (2003). Vulnerability and risk: Some thoughts from a political and policy perspective. *Risk Anal.* 23, 805–810. doi:10.1111/1539-6924.00357.
- Sayers, P., Gouldby, B., Simm, J., Meadowcroft, I., y Hall, J. (2003). Risk, performance and uncertainty in flood and coastal defence – a review. *R&D Tech. Rep. FD2302/TR1*, 115.
- Sharples, C. (2006). Indicative mapping of Tasmanian Coastal Geomorphic vulnerability to sea-level rise using GIS line map of coastal geomorphic attributes. *Wollongong Pap. Marit. Policy* 16, 235–247. Available at: <http://trove.nla.gov.au/version/187629523>.
- Sharples, C., Mount, R., y Pedersen, T. (2009). the Australian Coastal Smartline Geomorphic and Stability Map Version 1: Manual and Data Directory. Australian Government, Geoscience Australia, University of Tasmania.
- Short, A. D., y Masselink, G. (1993). The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model. *J. Coast. Res.* 9, 785–800.

- Stronkhorst, J., Levering, A., Hendriksen, G., Rangel-Buitrago, N., y Appelquist, L. R. (2018). Regional coastal erosion assessment based on global open access data: a case study for Colombia. *J. Coast. Conserv.* 22, 787–798. doi:10.1007/s11852-018-0609-x.
- Tejada De la Cruz, R. X. (2018). Sectores costeros más vulnerables entre Lurín y Pucusana ante un posible aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático: Adaptación y aplicación del índice de vulnerabilidad costera de Gornitz (1991). *Espac. y Desarro.* 31, 59–86. doi:10.18800/espacioydesarrollo.201801.003.
- Thieler, E. R., y Hammar-Klose, E. S. (1999). National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise. *Open-File Rep. 00-179*, 1.
- Thierler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. ., y Ergul, A. (2009). DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide. Updated for version 4.3 (only compatible with ArcGIS 10). Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1278/>.
- Torres Rodríguez, V., A., Márquez Gacía, A., Bolongaro Crevenna, J., Chavarria Hernández, G., García, E. D., y Márquez, E. (2010). “Tasa de erosión y vunerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climatico”, en *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climatico.*, ed. A. V. B. S. V.-F. J. G. y J. L. R. Galaviz. (Campeche: Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.), 325–344. Available at: <http://www.anide.edu.mx/archivos/CAP15TasaerosionCosteraCampeche.pdf>.
- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., y Marcomini, A. (2012). Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: The case study of the North Adriatic Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 2347–2368. doi:10.5194/nhess-12-2347-2012.
- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., Zabeo, A., Furlan, E., y Marcomini, A. (2016). DESYCO: A decision support system for the regional risk assessment of climate change impacts in coastal zones. *Ocean Coast. Manag.* 120, 49–63. doi:10.1016/j.ocecoaman.2015.11.003.
- UNDRO (1979). Natural disasters and vulnerability analysis : report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979) : Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive. Available at: <https://archive.org/details/naturaldisasters00offi/page/4>.
- UNISDR (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Available at: www.preventionweb.net.

- USGS. Woods Hole Coastal and Marine Science Center Sistema de análisis de costa digital (DSAS). Available at: https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- USGS EROS (2019). Landsat Collection 1 Level 1 Product Definition. 26. Available at: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1656_Landsat_Collection1_L1_Product_Definition-v2.0.pdf%0Ahttps://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1656_Landsat_Level-1_Product_Collection_Definit.
- Vázquez-Bolletto, A. (2008). Regional assessment of the current and future vulnerability of the Mexican coastal zone and the most impacted deltas due to sea level rise due to climate change and extreme hydrometeorological phenomena. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL.
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., y McCall, R. (2018). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a Coastal Risk Assessment Framework. *Coast. Eng.* 134, 33–47. doi:10.1016/j.coastaleng.2017.09.002.
- Vittal Hegde, A., y Radhakrishnan Reju, V. (2007). Development of Coastal Vulnerability Index for Mangalore Coast, India. *J. Coast. Res.* 23, 1106. doi:10.2112/04-0259.1.
- Warrick, R. A. (2009). Using SimCLIM for modelling the impacts of climate extremes in a changing climate: A preliminary case study of household water harvesting in Southeast Queensland. en *18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings*, 2583–2589.
- Zanuttigh, B., Simcic, D., Bagli, S., Bozzeda, F., Pietrantoni, L., Zagonari, F., et al. (2014). THESEUS decision support system for coastal risk management. *Coast. Eng.* 87, 218–239. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.11.013.